

Dr. ing. Mircea Degeratu

- profesor universitar la Departamentul de Hidraulică și Protecția Mediului din Universitatea Tehnică de Construcții București;
- profesor invitat la Universitatea din București, la Universitatea Paris 12 – Val de Marne și la Universitatea Paris 7 – Denis Diderot;
- membru titular al Academiei Oamenilor de Știință din România;
- președintele grupului de lucru Modelarea Proceselor Hiperbare din cadrul comisiei Tehnologii și Instalații Hiperbare din Academia Oamenilor de Știință din România;
- consultant oficial al Centrului de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române în probleme de Mecanica Fluidelor aplicată tehnologiilor hiperbare.

Dr. ing. Aron Petru

- doctor în Hidraulică hiperbară la Departamentul de Hidraulică și Protecția Mediului din Universitatea Tehnică de Construcții București;
- căpitan-comandor la Centrul de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române (până în 1993);
- șef al Laboratorului Hiperbar și al Laboratorului Pătrunderea Omului sub Apă (până în 1993) ;
- director al firmei de intervenții submarine S.C. TETHYS-PRO S.R.L. din Constanța;
- Diving Manager la Saturation Diving Team din cadrul Grupului Servicii Petroliere (GSP) Constanța.

Sergiu Ioniță

- scafandru profesionist, brevetat în S.U.A. la școala Professional Diving School of New York;
- specializat în scufundarea de mare adâncime la școala Commercial Diving Institut of New York;
- angajat al unor firme de intervenții submarine de prestigiu din S.U.A. dintre care pot fi enumerate Oceaneering Int., American Oilfield Divers Inc., Martech Int. și Brundette Diving, specializate în intervenții submarine la instalațiile petroliere offshore din Golful Mexic.

ISBN 978-606-8636-59-7

Mircea DEGERATU, Aron PETRU, Sergiu IONIȚĂ CALCULUL APARATELOR SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ

MIRCEA DEGERATU

ARON PETRU **SERGIU IONIȚĂ**

CALCULUL APARATELOR SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ





Editura Academiei Oamenilor de Știință din România

MIRCEA DEGERATU
Laureat al Premiului „Hermann Oberth” al
Academiei Oamenilor de Științâ din România

ARON PETRU **SERGIU IONIȚĂ**

CALCULUL APARATELOR SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ





Editura Academiei Oamenilor de Știință din România
Bucureşti, 2019

Referent ştiinţific: Comandor, CS III, drd. ing. Mihai DIACONU
Centrul de Scafandri Constanța
Forțele Navale Române

Descrierea CIP a Bibliotecii Naţionale a României
DEGERATU, MIRCEA
Calculul aparatelor speciale de respirat sub apă / Mircea Degeratu..., Aron Petru, Sergiu Ioniţă. - Bucureşti : Editura Academiei Oamenilor de Ştiinţă din România, 2019
Conţine bibliografie
ISBN 978-606-8636-59-7

I. Petru, Aron
II. Ioniţă, Sergiu

62

Coperta 1: Scafandri de incursiune ai Centrului de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române, echipați cu aparate de respirat sub apă cu oxigen, în circuit închis

În memoria **Viceamiralului ing. Ilie Ștefan**
fost Comandant al Centrului de Scafandri Constanța
din cadrul Forțelor Navale Române

Mircea DEGERATU

Aron PETRU **Sergiu IONIȚĂ**

CALCULUL APARATELOR SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ

CUPRINS

PREFAŢĂ

Scufundările militare şi industriale, autonome sau cu alimentare de la suprafaţă, prin cerinţele lor operaţionale și deci prin destinația lor specială, presupun utilizarea unor aparate speciale de respirat sub apă.

Din categoria aparatelor speciale de respirat sub apă fac parte aparatele cu circuit deschis, închis, semiînchis şi mixt cu mare autonomie şi, mai ales, cu randament al scufundării ridicat. Aceste aparate de respirat sub apă speciale utilizează, în afară de aer, atât amestecuri de gaze respiratorii binare supraoxigenate aşa cum sunt amestecurile azot-oxigen (NITROX) şi heliu-oxigen (HELIOX), cât şi, uneori, amestecuri de gaze respiratorii ternare aşa cum este amestecul heliu-azot-oxigen (TRIMIX).

Cartea este structurată pe cinci capitole, primele două capitole referindu-se la gazele şi amestecurile de gaze utilizate în circuitele aparatelor speciale de respirat sub apă, următoarele două capitole prezentând tipuri de aparate speciale de respirat sub apă cu circuit deschis, închis, semiînchis şi mixt, iar ultimul capitol referindu-se la calculul gazodinamic al circuitelor aparatelor speciale de respirat sub apă de tipul cu circuit închis, semiînchis şi mixt.

Lucrarea, prima de acest gen din România, este rezultatul activităţilor de cercetare şi proiectare efectuate în comun de Departamentul de Hidraulică şi Protecţia Mediului din Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti şi Centrul de Scafandri din Constanţa din cadrul Forţelor Navale Române şi al colaborării acestor unităţi de învățământ și cercetare-proiectare cu faimoasa firmă germană Dräger.

Cartea se adresează, în primul rând, specialiştilor în domeniul hiperbar, inginerilor specializaţi în proiectarea, realizarea şi exploatarea aparatelor de respirat sub apă şi scafandrilor profesionişti specializaţi în scufundarea militară şi industrială cu aparate speciale de respirat sub apă.

Autorii

1.

GAZE UTILIZATE LA APARATELE SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ

Un rol important în conceperea, proiectarea, realizarea şi exploatarea aparatelor de respirat sub apă îl au gazele şi amestecurile de gaze respiratorii utilizate în cadrul acestor aparate. Tipul gazului sau amestecului respirator utilizat este impus de tipul aparatului de scufundare folosit şi de tehnologia de scufundare adoptată.

Pentru alegerea corectă a gazului sau amestecului respirator în cadrul diferitelor aparate de respirat sub apă şi pentru stabilirea cu precizie a tehnologiei de scufundare, este necesară cunoaşterea în detaliu a caracteristicilor fizice ale gazelor utilizate. De asemenea, pentru obţinerea unor amestecuri de gaze cu participaţii volumice (concentraţii) ale componentelor dorite, este necesară cunoaşterea metodelor de fabricare a acestor amestecuri respiratorii.

1.1. DATE GENERALE PRIVIND GAZELE UTILIZATE ÎN SCUFUNDAREA CU APARATE SPECIALE

Primul gaz utilizat în scufundare a fost *aerul* care este un amestec respirator natural. Folosit la adâncimi mari aerul pune probleme importante cu implicaţii în revenirea scafandrului la presiunea atmosferică, impunând precauţii severe pentru evitarea unor accidente datorate fie apariţiei unor stări anormale, fie unei decompresii necorespunzătoare.

Pentru evitarea acestor probleme, cunoscut fiind faptul că oxigenul este gazul indispensabil vieţii şi considerându-se că este "inofensiv", s-a încercat executarea de scufundări numai cu oxigen pur. Din păcate, utilizarea oxigenului pur deşi a eliminat accidentele de decompresie, a condus, în cazul scufundărilor la adâncimi mai mari de 7...10 m, la alte accidente specifice oxigenului. Aceste accidente au fost foarte grave şi uneori mortale, prin acestea infirmându-se "inofensivitatea" oxigenului respirat la presiuni mai mari decât presiunea atmosferică. Astfel, a reapărut necesitatea diluării oxigenului şi realizării unor amestecuri respiratorii sintetice. De asemenea a apărut şi necesitatea găsirii unor noi gaze zise "inerte" pentru eliminarea neajunsurilor provocate de azotul din aerul atmosferic. Considerate ca inerte, pentru că nu sunt nici metabolizate, nici produse de organism, ele sunt totuşi generatoare de efecte biochimice cu atât mai evidente cu cât presiunea parţială a gazului inert, din amestecul gazos respirator, creşte o dată cu creşterea adâncimii de scufundare.

Indiferent de gazul inert utilizat ca diluant al oxigenului, unul din marile neajunsuri ale gazului inert este efectul narcotic pe care îl induce. În prezent, se admite că acţiunea fiziologică a unui amestec gazos respirator depinde de compoziţia sa, de concentraţiile (participaţiile volumice) ale gazelor care alcătuiesc amestecul, precum şi

de presiunea la care este respirat. Ultimii doi factori, corelaţi cu acţiunea fiziologică a amestecului respirator, determină valoarea maximă admisă a presiunii parţiale a gazului inert astfel încât efectul narcotic să nu-şi facă apariţia.

Este deci important să se cunoască faptul că toate gazele zise "inerte" au o putere narcotică apropiată de aceea a gazelor anestezice (cum ar fi protoxidul de azot), că această putere narcotică este funcţie de solubilitatea lor în grăsimi raportată la solubilitatea lor în apă (coeficientul Mayer-Overton) şi funcţie, de asemenea, de masa lor specifică (densitatea), ceea ce este evident pentru gazele grele. Astfel, narcoza începe de la adâncimea de 60 m cu azot, de la 40 m cu argon şi chiar la presiunea atmosferică cu xenon, pentru amestecuri cu 80% gaz inert. Din contră, deşi este cel mai uşor gaz dintre gazele utilizate ca diluant pentru oxigen, hidrogenul este mai narcotic ca heliul care este de două ori mai greu, motiv pentru care hidrogenul se distinge de celelalte gaze prin proprietăţile sale originale. Heliul poate fi considerat deci ca cel mai inert dintre gaze, dar puterea sa narcotică, cunoscută ca foarte slabă, este perfect perceptibilă la adâncimi foarte mari.

În tabelul 1.1 sunt prezentate câteva proprietăţi ale gazelor zise "inerte", legate de puterea lor narcotică.

Tabelul 1.1

Câteva proprietăţi ale gazelor zise "inerte"

Gaz	Masa molară [kg/kmol]	Densitatea [kg/m^3]*	Numărul Van der Waals** *a*	Solubilitatea [m ℓ/ℓ]		
				în apă (la 37^0C)	în grăsimi (la 37^0C)	M.O.***
Heliu	4	0,18	0,034	9,2	17	1,85
Neon	20	0,90	0,21	10,6	22	2,07
Hidrogen	2	0,09	0,24	18,0	57	3,17
Azot	28	1,25	1,39	14,5	76	5,24
Argon	40	1,78	1,34	33,0	150	4,54
Kripton	83,8	3,75	2,32	70,0	490	7,00
Xenon	131	5,90	4,19	130,0	1700	13,07

*Valorile densităţilor sunt la 0^0C şi la presiunea atmosferică normală;

**Numărul lui Van der Waals *a* exprimă forţa de atracţie intermoleculară;

***Coeficientul Mayer-Overton = $\frac{\text{Solubilitatea în grăsimi}}{\text{Solubilitatea în apă}}$, în relaţie cu puterea narcotică.

Un alt neajuns, la fel de important, îl constituie faptul că, la decompresie, gazul inert se poate degaja cu formarea de bule, care pot provoca accidente serioase în cazul nerespectării unei proceduri speciale de revenire la presiunea atmosferică. În plus, absenţa prelungită a azotului din amestecurile respiratorii poate sta la baza unor importante modificări de ordin fiziologic, iar în perioada schimbării amestecurilor respiratorii apare, la nivelul membranelor, o contradifuzie izobarică a gazelor inerte dizolvate în ţesuturi.

1.2. CARACTERISTICILE GAZELOR UTILIZATE ÎN SCUFUNDAREA CU APARATE SPECIALE

Prin urmare, pentru contracararea efectelor hiperoxiei, oxigenul trebuie diluat prin amestecare cu gaze diluante, zise şi gaze "inerte". Dintre acestea, în continuare sunt prezentate, pe lângă oxigen, cele mai utilizate gaze diluante în fabricarea amestecurilor respiratorii folosite la aparatele de respirat sub apă speciale, azotul şi heliul.

1.2.1. OXIGENUL ŞI EFECTELE ACESTUIA

Oxigenul este cel mai important dintre toate gazele utilizate în scufundare deoarece este indispensabil vieţii şi este elementul chimic cel mai răspândit din natură. Aerul atmosferic conţine aproximativ 21% oxigen liber, în stare moleculară.

1.2.1.1. Caracteristicile oxigenului

Acest gaz, inodor, incolor şi insipid este foarte activ combinându-se uşor cu alte elemente. În tabelul 1.2 sunt prezentate cele mai importante caracteristici fizice ale oxigenului.

Tabelul 1.2

Proprietăţile fizice ale oxigenului

Mărimea	Valoarea
Volumul molar $[\mathrm{m^3/kmol}]$	22,403
Masa molară $[\mathrm{kg/kmol}]$	31,999
Temperatura critică T_{cr} [K]	154,4
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc.abs.) T_f [K]	90,2
Conductibilitatea termică k $[\mu\mathrm{cal/cm \cdot s \cdot K}]$	58,5
Coeficientul de autodifuzie $D[\mathrm{cm^2/s}]$	0,189
Densitatea ρ [g/*l*]	1,429
Coeficientul dinamic de viscozitate μ[micropoise]*	192,6
Căldura specifică masică la volum constant c_v [cal/g K]	0,157

Mărimea	Valoarea
$k/\mu c_v$	1,93
$D\rho/\mu$	$1{,}4 \cdot 10^{-3}$
Constante Van der Waals: a – at/(*l*/mol)^2; b – *l*/mol	1,36; 0,0318
Presiunea critică p_{cr} [ata]**	49,7
T_f/T_{cr}	0,58
Diametrul moleculei [Å]***	3,62
Solubilitatea în apă [*l*/*l*]	0,0314
Solubilitatea în alcool etilic [*l*/*l*]	0,1431
Solubilitatea în benzen [*l*/*l*]	0,163

*1 micropoise = 10^{-3} poise = 10^{-3} g/(cm s) = dyn s/cm^2; **ata – atmosferă în scara absolută; ***Å – angström (1 Å = 10^{-8} cm).

În scufundare, pentru prima dată a fost utilizat oxigenul pur, în cel de-al doilea război mondial, de către scafandrii de luptă italieni. Aceştia, echipaţi cu combinezoane grele, etanşe şi cu aparate de respirat sub apă în circuit închis, au efectuat intervenţii sub apă cu scop militar. Nu cunoşteau nimic despre toxicitatea oxigenului, motiv pentru care au avut pierderi chiar pe timpul antrenamentelor.

În prezent, când fenomenele de toxicitate ale oxigenului sunt cunoscute şi controlate, oxigenul este utilizat, la aparatele de respirat sub apă, atât pur cât şi amestecat cu gaze inerte sub formă de amestecuri respiratorii. Pentru dozarea corespunzătoare a oxigenului pur sau a amestecului respirator către scafandru, este necesară cunoaşterea consumului individual de oxigen funcţie de activitatea subacvatică desfăşurată de scafandru (tab. 1.3).

Tabelul 1.3

Consumul individual de oxigen funcţie de activitatea subacvatică desfăşurată de scafandru (NOAA Diving Manual)

Activitatea desfăşurată de scafandru	Consum O_2 [l_N/min]	Ventilaţie pulmonară [l_N/min]
Repaus	0,4	8
Lucrări uşoare, înot cu viteza $v = 0{,}5\,\text{Nd*} = 0{,}257$ m/s	0,8	18
Lucrări moderate, înot cu viteza $v = 0{,}8\,\text{Nd} = 0{,}411$ m/s	1,3	30
Lucrări intense, înot cu viteza $v = 1{,}0\,\text{Nd} = 0{,}514$ m/s	1,7	40
Lucrări foarte grele, înot cu viteza $v = 1{,}2\,\text{Nd} = 0{,}617$ m/s	2,5	60

*Nd – nod, unitate de măsură a vitezei egală cu 1 milă marină pe oră: 1 Nd = 1,852 km/h = 0,514 m/s.

În cazul scufundărilor cu alimentare la narghilea şi a scufundărilor autonome cu plecare de la suprafaţă, în cadrul aparatelor de respirat sub apă, se utilizează de obicei amestecuri gazoase binare supraoxigenate. Utilizarea amestecurilor respiratorii cu concentraţii mari de oxigen (cu participaţii volumice ale oxigenului, r_{O_2}, mari) se justifică prin aceea că viteza de revenire la presiunea atmosferică, deci viteza de decompresie, este dictată de timpul necesar eliminării gazului inert dizolvat la un moment dat în organismul uman. Cantitatea de gaz inert dizolvată este funcţie de presiunea parţială a acestuia din amestecul respirator, cu alte cuvinte, pentru o adâncime dată, cu cât participaţia volumică a oxigenului în amestecul respirator, r_{O_2}, este mai mare, cu atât cantitatea de gaz inert ce se va dizolva în ţesuturi va fi mai mică şi implicit viteza de revenire la presiunea atmosferică va fi mai mare.

Astfel, pentru o anumită adâncime de scufundare, care corespunde unei presiuni totale a amestecului gazos respirator, p_{am}, şi pentru un amestec de gaz azot-oxigen (NITROX) caracterizat prin participaţiile volumice ale componentelor r_{O_2} şi r_{N_2}, ($r_{O_2} + r_{N_2} = 1$), presiunile parţiale ale celor două componente ale amestecului sunt

$p_{O_2} = r_{O_2}\ p_{am}$ şi respectiv $p_{N_2} = r_{N_2}\ p_{am}$, ($p_{O_2} + p_{N_2} = p_{am}$). Este evident faptul că, pentru reducerea timpului de decompresie, este necesară reducerea presiunii parţiale a gazului inert (azotului) din amestec, p_{N_2} şi deci creşterea corespunzătoare a presiunii parţiale a oxigenului din amestec, p_{O_2}. Pentru un p_{am} dat, creşterea presiunii parţiale p_{O_2} conduce la necesitatea utilizării unui amestec gazos azot-oxigen cu o participaţie volumică a oxigenului din amestec, r_{O_2}, ridicată, deci a unui amestec NITROX supraoxigenat (cu o valoare a participaţiei volumice a oxigenului, r_{O_2}, mai mare ca 0,21, valoare corespunzătoare aerului). Aceleaşi consideraţii sunt valabile şi pentru amestecurile gazoase binare heliu-oxigen (HELIOX).

Creşterea participaţiei volumice a oxigenului, r_{O_2}, în amestecul respirator, pentru o anumită adâncime de scufundare şi deci pentru o anumită valoare a presiunii totale a amestecului gazos p_{am}, este limitată de creşterea peste o anumită valoare a presiunii parţiale a oxigenului din amestec, p_{O_2}, dincolo de care pot apărea fenomenele de hiperoxie.

Concludent este tabelul 1.4, care prezintă comparativ duratele de decompresie pentru scufundări efectuate cu utilizarea amestecurilor respiratorii azot-oxigen (NITROX) caracterizate prin diferite concentraţii de oxigen.

Tabelul 1.4

Comparaţie între duratele decompresiei la scufundări folosind amestecuri respiratorii azot-oxigen (NITROX) cu diferite concentraţii de oxigen

(decompresii calculate după metoda Laboratorului Hiperbar din Constanţa)

Scufundare de 100 minute la 30 m adâncime				
Amestec respirator	Aer	NITROX		
	21% O_2	30% O_2	40% O_2	50% O_2
Durata totală a decompresiei [minute]	88,4	45,6	20,8	2,8

1.2.1.2. Efectele oxigenului asupra scafandrilor

Limitele impuse de oxigen în scufundare, au fost determinate experimental şi sunt prezentate grafic în figura 1.1.

Pe abscisă este reprezentată adâncimea de scufundare, în metri şi presiunea corespunzătoare adâncimii, în bar (sc. abs.), iar pe ordonată, concentraţia oxigenului (%O_2) şi concentraţia gazului inert (% gaz inert) în amestec. Curba I reuneşte punctele a căror presiune parţială a oxigenului este p_{O_2} = 0,17 bar (sc. abs.), curba II punctele a căror presiune parţială a oxigenului este p_{O_2} = 2 bar (sc. abs.), iar curba reprezentată cu linie întreruptă punctele a căror presiune parţială a oxigenului este p_{O_2} = 0,21 bar (sc. abs.). Curba I reprezintă curba limită inferioară a zonei de securitate, sub această curbă existând zona de hipoxie şi anoxie, curba II reprezintă curba limită superioară a zonei de securitate, peste această curbă existând zona de hiperoxie, iar curba desenată cu linie întreruptă este curba de normoxie corespunzătoare unei presiuni parţiale a oxigenului p_{O_2} = 0,21 bar (sc. abs.) egală cu cea a oxigenului din aerul la presiunea atmosferică.

Înainte de a face comentarii asupra graficului din figura 1.1, este necesar să se precizeze importanţa factorului timp în apariţia accidentelor datorate deficitului de oxigen (hipoxie) şi lipsei de oxigen (anoxie) sau presiunii în exces a acestuia (hiperoxie).

Respirând un amestec cu presiunea parţială a oxigenului sub valoarea corespunzătoare curbei I ($p_{O_2} < 0{,}17$ bar (sc. abs.)) se riscă o sincopă hipoxică sau anoxică, ce apare fără nici un semnal de avertizare. Timpul de latenţă este 1…2 minute, funcţie de activitatea desfăşurată sub apă. Pot apărea însă semnale de alarmă în zona presiunilor parţiale ale oxigenului cuprinse între 0,17 bar (sc. abs.) şi 0,1 bar (sc. abs.), dar aceste semnale nu sunt întotdeauna percepute de scafandri şi deci, nu se poate pune bază pe acestea ca elemente de stabilire a începutului unei crize de hipoxie.

În continuare, se prezintă efectele presiunii parţiale a oxigenului, p_{O_2}, în cazul hipoxiei:

- $p_{O_2} < 0{,}17$ bar (sc. abs.): pulsul şi frecvenţa respiraţiei cresc, atenţia scade, mişcările delicate diminuează;
- $p_{O_2} \leq 0{,}1$ bar (sc. abs.): judecată eronată, insensibilitate, oboseală, apariţia cianozei;
- $p_{O_2} = 0{,}06…0{,}07$ bar (sc. abs.): greaţă, vomă, imposibilitate de efort, cianoză intensă;
- $p_{O_2} < 0{,}06$ bar (sc. abs.): respiraţie neregulată, convulsii, sincopă, moarte.

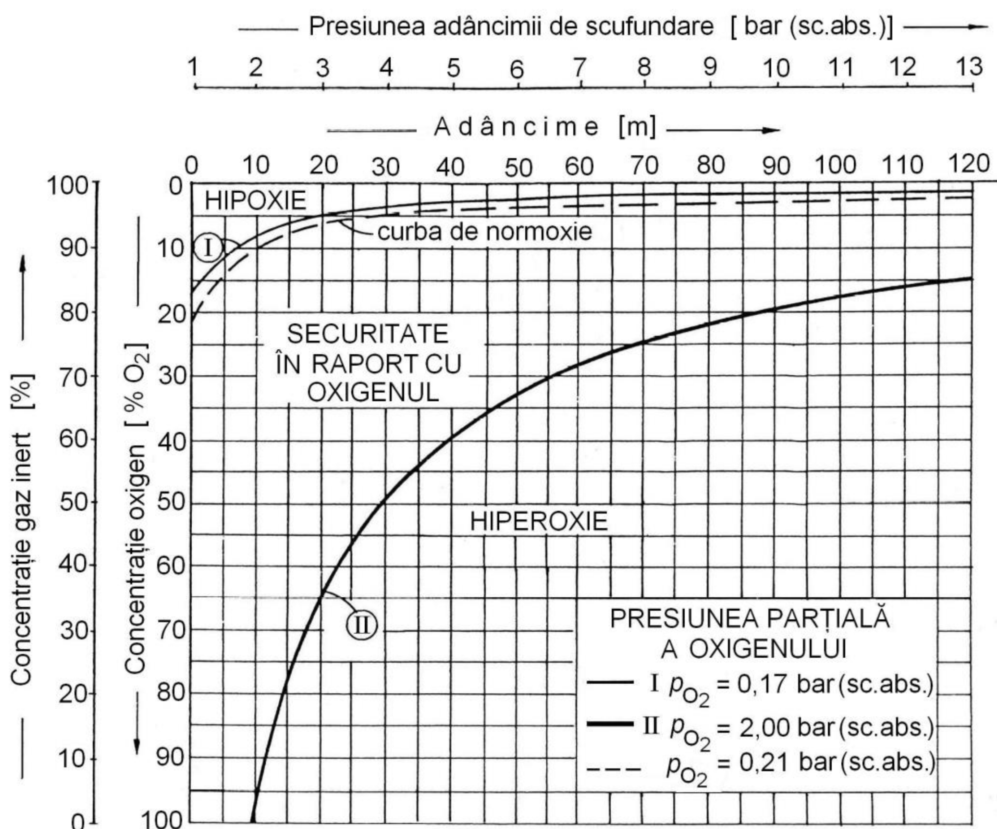


Fig. 1.1. Reprezentarea grafică a limitelor impuse pentru oxigen în amestecurile respiratorii.

Respirând un amestec cu presiunea parţială a oxigenului peste valoarea corespunzătoare curbei II (p_{O_2} > 2 bar (sc. abs.)) se riscă o criză convulsivă de tip hiperoxic. Această criză nu apare imediat ce s-a depăşit pragul critic, ea producându-se dacă expunerea se prelungeşte peste anumite limite de timp, care definesc latenţa fenomenului. Latenţa variază de la individ la individ sau chiar la acelaşi individ funcţie de efortul depus, frig, oboseală etc. După U.S. Navy Diving Manual, timpii de latenţă la respirarea oxigenului pur, sunt:

– 7 ore la 7 metri adâncime (p_{O_2} = 1,7 bar (sc. abs.));
– 3 ore la 8 metri (p_{O_2} = 1,8 bar (sc. abs.));
– 50 minute la 10 metri (p_{O_2} = 2 bar (sc. abs.));
– 30 minute la 20 metri (p_{O_2} = 3 bar (sc. abs.));
– 10 minute la 25 metri (p_{O_2} = 3,5 bar (sc. abs.)).

Activitatea în mediul marin scurtează timpul de latenţă. Astfel, pentru adâncimea de 18 m, în incinte hiperbare uscate (barocamere), timpul de latenţă poate ajunge până la 2 ore, iar în mediul marin el este de numai 40 minute. Pentru exemplificare, în figura 1.2 se prezintă curbele aproximative ale timpilor de latenţă ce preced criza convulsivă neurotoxică, funcţie de adâncime, pentru cazul în care se respiră oxigen pur.

Variaţiile individuale ale timpului de latenţă sunt, de asemenea, foarte întinse şi imprevizibile. La acelaşi individ, timpul de latenţă poate fi cuprins între 7 minute şi 2,5 ore. Semnele de alarmă iau aspectul unor mici crize foarte localizate, cu durată scurtă, greţuri, indispoziţii, tremur al buzelor sau muşchilor feţei, crampe musculare, jenă respiratorie, accelerarea pulsului şi palpitaţii. Apoi, totul reintră în normal până la o nouă criză respiratorie. Astfel, pot apărea mai multe crize mici până la marea criză convulsivă. Acest efect neurotoxic al oxigenului a fost descris pentru prima dată de Paul Bert în anul 1878. Câţiva ani mai tărziu, în 1899, Lorrain Smith a arătat că oxigenul inhalat în mod continuu şi timp îndelungat, provoacă leziuni pulmonare chiar şi la presiunea atmosferică. Primul efect, *efectul Paul Bert*, interesează scafandrii autonomi ce folosesc aparate cu oxigen pur sau cu amestecuri supraoxigenate, iar cel de-al doilea efect, *efectul Lorrain Smith*, interesează scafandrii ce staţionează timp îndelungat în incinte hiperbare supraoxigenate, cum este cazul scafandrilor aflaţi în saturaţie, sau al tratamentelor prin oxigenoterapie hiperbară.

Limitele de securitate pentru utilizarea oxigenului pur, recomandate în urma experimentărilor sunt:

– în scufundări unitare reale: 6,5...7 m adâncime (p_{O_2} = 1,65…1,7 bar (sc. abs.));
– la paliere de decompresie în apă: 6 m adâncime (p_{O_2} = 1,6 bar (sc. abs.));
– la paliere de decompresie în turele de scufundare sau în barocamere: 12 m adâncime (p_{O_2} = 2,2 bar (sc. abs.));
– în tratamentul accidentelor de scufundare: 9 m adâncime (p_{O_2} = 1,9 bar (sc. abs.)); în acest caz, cea mai bună combinaţie este 25 minute oxigen şi 5 minute aer sau alt amestec oxigen-gaz inert;

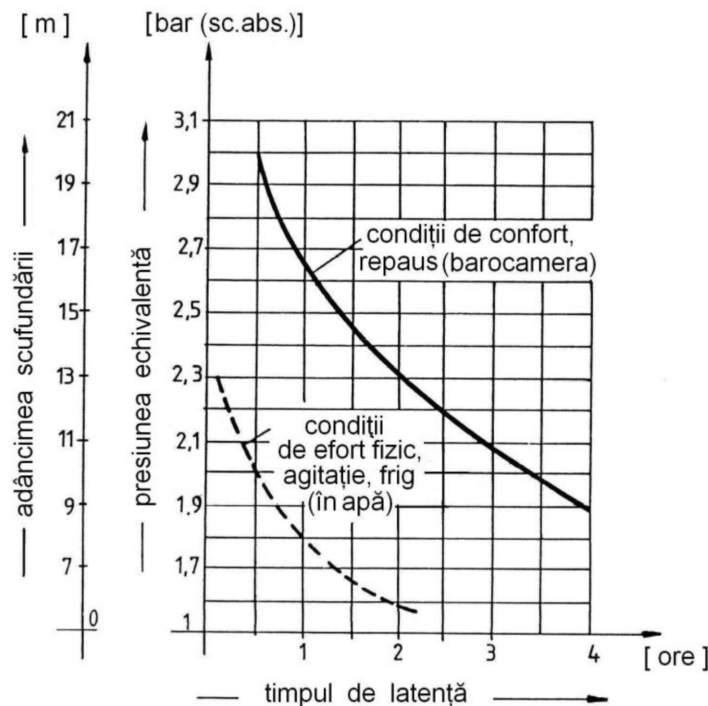


Fig. 1.2. Curbele aproximative ale timpilor de latenţă ce preced criza convulsivă neurotoxică, funcţie de adâncimea scufundării (sau de presiunea echivalentă).

– la testele de aptitudine în stabilirea toleranţei la oxigenul hiperbar: 18 m adâncime (p_{O_2} = 2,8 bar (sc. abs.)); la scafandri de luptă, cei mai expuşi dintre scafandri la hiperoxie, se recomandă ca testul să se efectueze la adâncimea de 20 m (p_{O_2} = 3 bar (sc. abs.)) cu urmărirea răspunsului pe electroencefalogramă.

În cazul scufundărilor cu amestecuri respiratorii sintetice sau cu aer, presiunea parţială a oxigenului se va menţine în limitele maxime admisibile de 1,2...1,6 bar (sc. abs.).

Cu alte cuvinte, aerul atmosferic poate fi folosit, din punct de vedere al toxicităţii oxigenului, în condiţii de securitate deplină până la adâncimea de 75 m. În realitate, la scufundarea cu aer, această adâncime nu poate fi atinsă decât de profesionişti antrenaţi, datorită limitei impuse de narcoza cu azot (50...60 m). După unii autori, pentru durată limitată, presiunea parţială a oxigenului de 2 bar (sc. abs.) într-un amestec respirator este foarte bine suportată de scafandri.

Pentru scafandrii militari, de incursiune şi deminori, care utilizează de obicei aparate de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen pur sau aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis cu amestec NITROX, au fost propuse o serie de limite de timp practice privind utilizarea oxigenului pur sau a amestecului binar NITROX de către U. S. Navy sau de către **NOAA** (**N**ational **O**ceanic and **A**tmospheric **A**dministration). Aceste valori limită de expunere funcţie de presiunea parţială a oxigenului p_{O_2} sunt prezentate comparativ în tabelul 1.5.

Tabelul 1.5

Valori limită ale timpului de expunere a scafandrului la diferitele presiuni parţiale ale oxigenului în cazul scufundărilor autonome cu oxigen pur şi cu amestec NITROX

Limitele de utilizare a oxigenului pur U.S.Navy			Limitele de utilizare a amestecului NITROX U.S.Navy		Limitele de expunere pentru scufundări cu amestec NITROX NOAA		
p_{O_2} [bar(sc.abs.)]	Adâncime [m]	Durata maximă [min]	p_{O_2} [bar(sc.abs.)]	Durata maximă [min]	p_{O_2} [bar(sc.abs.)]	Durata maximă pentru o singură scufundare pe zi [min]	Durata maximă pentru mai multe scufundări pe zi [min]
Expuneri normale							
					0,6	720	720
					0,7	570	570
					0,8	450	450
					0,9	360	360
			1,0	240	1,0	300	300
			1,1	120	1,1	240	270
			1,2	80	1,2	210	240
1,3	3	240	1,3	60	1,3	180	210
			1,4	50	1,4	150	180
1,45	4,5	120					
			1,5	40	1,5	120	180
			1,6	30	1,6	45	150
1,7	7	90					
1,85	8,5	65					
Expuneri excepţionale							
			1,3	240	1,3	240	
			1,4	180	1,4	180	
			1,5	120	1,5	150	
			1,6	100	1,6	120	
			1,7	80	1,7	75	
			1,8	60	1,8	60	
1,9	9	45					
2,05	10,5	34					
2,2	12	25					
2,35	13,5	15					

Din prezentarea comparativă a limitelor de timp privind expunerea la oxigen a scafandrilor militari autonomi respirând oxigen pur sau amestecuri NITROX (tab. 1.5), rezultă diferenţele importante între valorile impuse de diferitele şcoli şi deci marele grad de incertitudine inerentă studiilor privind expunerea scafandrului la oxigen.

În cazul scufundărilor care necesită staţionarea îndelungată a scafandrilor într-o ambianţă cu presiunea parţială a oxigenului ridicată, problema se pune diferit, ţinând cont de *efectul Lorrain Smith*. Intoxicaţia pulmonară a oxigenului descrisă de Lorrain Smith în 1897 sub numele de *pneumonie cauzată de oxigen* trece foarte rapid prin mai multe faze de gravitate până la edem pulmonar. Aceasta este o intoxicaţie cronică ale cărei prime simptome, absolut benigne, nu apar decât după un interval de timp mai mare şi la o presiune parţială a oxigenului de peste 0,5 bar (sc. abs.). Spre exemplu, pentru un scafandru care respiră oxigen pur ($r_{O_2} = 1$) la adâncimea de 10 m ($p_{O_2} = 2$ bar (sc. abs.)) evoluţia semnelor şi simptomelor *pneumoniei* este următoarea:

– după aproximativ 4 ore: jenă respiratorie;
– după aproximativ 6 ore: jenă respiratorie netă şi tuse;
– după aproximativ 8 ore: arsuri retrosternale;
– după aproximativ 9 ore: arsuri şi tuse cu frecvenţă mărită.

În anul 1971 Clark şi Lambertsen au propus cuantificarea dozei de toxicitate a oxigenului respirat cu ajutorul unei unităţi toxice cumulative **UPTD** (**U**nit **P**ulmonary **T**oxicity **D**ose):

$$\text{UPTD} = \sqrt[-1,2]{\frac{0,5}{p_{O_2} - 0,5}}\, t = t\,(2 \cdot p_{O_2} - 1)^{0,833}\,, \qquad (1\text{-}1)$$

unde:

t este timpul de expunere la oxigenul hiperbar (min);

p_{O_2} – presiunea parţială a oxigenului din amestecul respirator (bar (sc. abs.)).

Trebuie menţionat faptul că în cazul utilizării oxigenului pur, presiunea parţială a oxigenului este chiar presiunea totală a gazului pur.

Clark şi Lambertsen au demonstrat că oxigenul hiperbar are influenţă asupra capacităţii vitale micşorând-o, la 50% din subiecţi, cu până la 20%, funcţie de timpul de expunere. Variaţia capacităţii vitale funcţie de UPTD este prezentată în tabelul 1.6.

În cazul scufundărilor în saturaţie cu un UPTD = 1900...2200, nu apar modificări semnificative ale capacităţii vitale, doza fiind considerată ca admisibilă.

Relaţia stabilită de Clark şi Lambertsen este satisfăcătoare când presiunea parţială a oxigenului, p_{O_2}, este constantă şi depăşeşte 1 bar (sc. abs.) (*Lemaire*, 1977).

Pentru expuneri la valori variabile ale presiunii parţiale a oxigenului, fie expuneri cu întreruperi, fie expuneri de nivel scăzut cuprinse între 0,5 şi 0,8 bar (sc. abs.), dar pentru durate lungi, cuantificarea propusă de Clark şi Lambertsen nu este cea mai concludentă.

Tabelul 1.6

Variaţia capacităţii vitale la 50% din subiecţi, funcţie de UPTD
(după *Clark,* 1970)

UPTD	Variaţia capacităţii vitale [%]
615	-2
825	-4
1035	-6
1230	-8
1425	-10
1815	-15
2190	-20

Ţinând cont de variaţiile capacităţii vitale, de simptomele apărute şi de faptul că în timpul decompresiei presiunea parţială a oxigenului este destul de aproape de limita toxică, 0,6 bar (sc. abs.), sau de faptul că aceasta poate varia, şcoala franceză de scufundare a renunţat la cuantificarea lui Clark şi Lambertsen. După Lemaire (1977), cuantificarea dozei de toxicitate a oxigenului respirat se determină cu formula:

$$U_2 = (p_{O_2})^2 t, \tag{1-2}$$

unde:

t este timpul de expunere la oxigenul hiperbar (ore);

p_{O_2} – presiunea oxigenului pur sau presiunea parţială a oxigenului din amestecul respirator (bar (sc. abs.)).

Determinarea efectului toxic cumulativ al oxigenului nu se poate face decât dacă presiunea lui parţială depăşeşte 0,5 bar (sc. abs.). Pe timpul expunerilor la amestecuri supraoxigenate, după Lemaire (1977), se pot atinge valori de 30 U_2 până la 36 U_2, funcţie de subiecţi, fără să apară diminuarea capacităţii vitale sau a simptomelor specifice pneumoniei.

Revenind la limitele de securitate ale presiunii parţiale a oxigenului, în cazul scufundărilor cu expuneri de lungă durată, în ambianţă hiperbară, se poate preciza:

– presiunea parţială a oxigenului la nivelul de viaţă: 300...400 mbar (sc. abs.), adică 0,3...0,45 bar (sc. abs.);
– presiunea parţială a oxigenului pe timpul decompresiei: mai mare de 500 mbar (sc. abs.), adică 0,5 bar (sc. abs.), dar astfel încât să nu se depăşească doza de toxicitate.

1.2.2. AZOTUL ŞI EFECTELE ACESTUIA

În scufundare, azotul se foloseşte ca diluant al oxigenului, fie în amestecul natural, aerul atmosferic, fie în amestecuri sintetice. Este componentul principal al aerului atmosferic, unde se găseşte în proporţie de 78...79%.

1.2.2.1. Caracteristicile azotului

Ca şi oxigenul, *azotul* este un gaz incolor, inodor şi insipid, aflându-se în componenţa tuturor organismelor în viaţă. În tabelul 1.7 sunt prezentate cele mai importante caracteristici fizice ale azotului.

Din punct de vedere chimic, aerul atmosferic se compune din 78...79% azot (r_{N_2} =0,78...0,79), 20...21% oxigen r_{O_2} =0,20...0,21, 0,03...0,04% dioxid de carbon (r_{CO_2} =0,0003...0,0004), 0,01% gaze rare (r_{gr} =0,0001) şi 0,2...0,6% vapori de apă (r_{H_2O} =0,002...0,006). Prin compoziţia sa chimică, aerul influenţează schimbul de gaze dintre organism şi mediu. În acest sens, omul inhalează zilnic 14...15 m^3 de aer, volum exprimat în condiţii normale (m_N^3), ceea ce reprezintă o cantitate mult mai mare faţă de apă (2,5 dm^3) sau alimente (1,5 kg). În plus, contactul dintre aer şi organism, măsurat la nivelul aparatului respirator, se realizează pe o suprafaţă de peste 90 m^2.

În amestecuri respiratorii sintetice, azotul se foloseşte la scufundări în saturaţie până la 50...70 m adâncime. Tot în amestecuri sintetice, azotul se foloseşte şi pentru scufundări autonome cu aşa numitele amestecuri supraoxigenate, în care concentraţia oxigenului poate fi 30 (32 sau 32,5), 40, 50, 60% ceea ce corespunde unor participaţii volumice r_{O_2} =0,30 (0,32 sau 0,325); 0,40; 0,50; 0,60. Adâncimea de scufundare cu astfel de amestecuri este limitată de efectul toxic datorat presiunii parţiale a oxigenului crescute.

Tabelul 1.7

Proprietăţile fizice ale azotului

Mărimea	Valoarea	Mărimea	Valoarea
Volumul molar [m^3/kmol]	22,403	$k/\mu c_v$	1,95
Masa molară [kg/kmol]	28,013	$D\rho/\mu$	$1{,}33 \cdot 10^{-3}$
Temperatura critică T_{cr} [K]	126,1	Constante Van der Waals: a – at/(*l*/mol)^2; b – *l*/mol	1,39; 0,0394
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc. abs.) T_f [K]	77,4	Presiunea critică p_{cr} [ata]	33,5
Conductibilitatea termică k [μcal/cm·s·K]	58,0	T_f/T_{cr}	0,61
Coeficientul de autodifuzie D[cm^2/s]	0,178	Diametrul moleculei [Å]	3,76
Densitatea ρ [g/*l*]	1,251	Solubilitatea în apă [*l*/*l*]	0,0155
Coeficientul dinamic de viscozitate μ[micropoise]	167,4	Solubilitatea în alcool etilic [*l*/*l*]	0,1304
Căldura specifică masică la volum constant c_v [cal/g K]	0,177	Solubilitatea în benzen [*l*/*l*]	0,1038

Scufundările cu amestecuri azot-oxigen (NITROX) supraoxigenate au câştig de cauză la adâncimi cuprinse între 18 şi 54 m datorită siguranţei pe care o conferă faţă de

scufundarea cu aer. Aceste amestecuri NITROX supraoxigenate sunt utilizate în mod curent la aparatele de respirat sub apă autonome cu circuit deschis, închis, semiînchis şi mixt.

Azotul se mai foloseşte injectat în amestecuri pe bază de heliu-oxigen pentru scufundări profunde, în proporţie de 5...10% ($r_{N_2} = 0{,}05...0{,}1$), în vederea ameliorării sindromului nervos al înaltelor presiuni (S.N.I.P.). Aceste amestecuri ternare heliu-azot-oxigen se mai numesc şi TRIMIX.

În ţara noastră, prin cercetările şi experimentările efectuate la Laboratorul Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri din Constanţa, aparţinând Forţelor Navale Române, au fost puse la punct tehnologii de pătrundere sub apă cu aer şi cu amestecuri azot-oxigen, elaborându-se tabele de decompresie pentru scufundări cu aer, tabele de decompresie pentru scufundări cu amestecuri NITROX supraoxigenate şi tabele de decompresie pentru scufundări cu amestecuri NITROX în condiţii de saturaţie. Aceste tehnologii şi-au găsit aplicaţia în operaţiunile cu scafandri efectuate la instalaţiile petroliere offshore din Marea Neagră, pentru amplasarea şi controlul periodic al platformelor de foraj marin şi al conductelor submarine.

1.2.2.2. Efectele azotului asupra scafandrilor

Limitele impuse de azot sunt legate de efectul narcotic al acestuia. Efectele sunt detectabile, pentru respirarea de aer, începând de la 35...40 m adâncime. Primele simptome nu sunt grave, dar la subiecţii neantrenaţi pot apărea complicaţii. Limitele impuse de azot în scufundare sunt prezentate în figura 1.3.

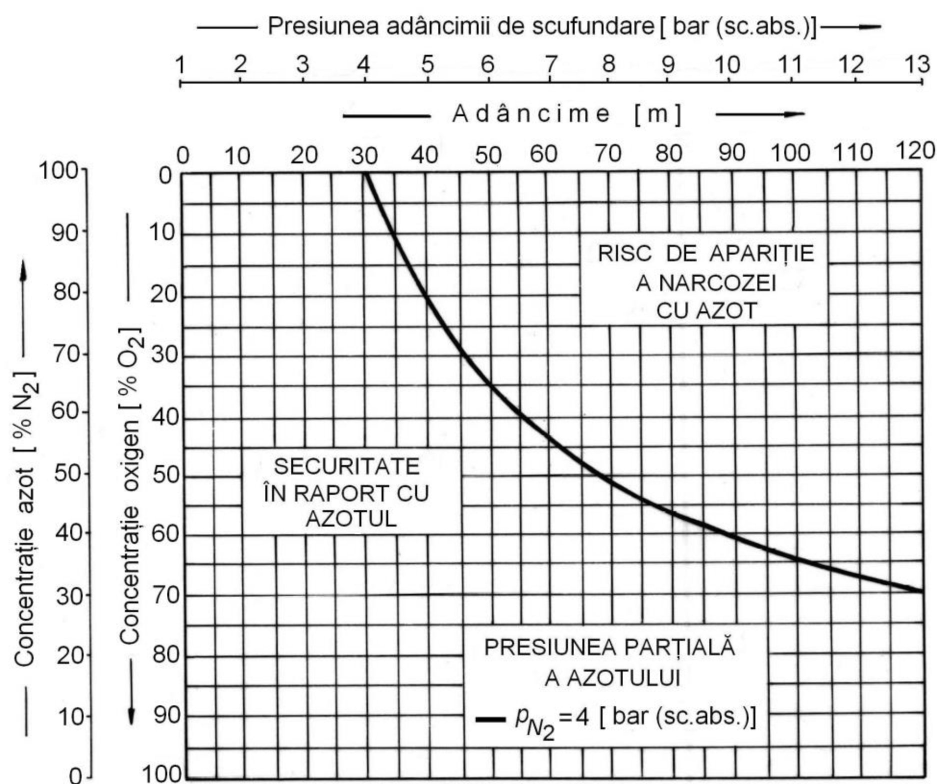


Fig. 1.3. Reprezentarea grafică a limitelor impuse pentru azot în amestecurile respiratorii.

Pe abscisă este reprezentată adâncimea de scufundare în metri şi presiunea corespunzătoare în bar (sc. abs.), iar pe ordonată sunt reprezentate concentraţiile de oxigen ($\% O_2$) şi de azot ($\% N_2$) din amestecul binar NITROX. Curba din figură este locul geometric al punctelor a căror presiune parţială a azotului este $p_{N_2} = 4$ bar (sc. abs.). Respirând un amestec NITROX caracterizat printr-o presiune parţială a azotului peste valoarea corespunzătoare curbei cu $p_{N_2} = 4$ bar (sc. abs.), se riscă apariţia narcozei cu azot (beţia adâncurilor).

Practic, se poate spune că narcoza cu azot pentru utilizarea aerului ca amestec respirator, apare începând de la adâncimea de 50 m, funcţie de individ şi că, de la 70 m adâncime, nimeni nu scapă de acest efect.

Narcoza cu azot a fost observată încă din anul 1835 de către Franchman care arată: "funcţiile creierului sunt activate, imaginea este vioaie, ideile au un şarm ciudat". Abia după o sută de ani, în 1935, Behnke descrie pentru prima dată tulburările provocate de azot, acea beţie a adâncurilor, numită de către Hill şi Mac Leod, în anul 1930, "nytrogen narcosis".

Efectele narcotice ale azotului din aerul respirat la presiuni ridicate par mai apropiate de efectele provocate LSD-25 sau de efectele datorate intoxicaţiilor etilice. De asemenea, se mai pot compara cu efectele narcotice ale unor droguri ca morfina, barbituricele sau etanolul. Totuşi, mecanismele nu sunt similare.

1.2.3. HELIUL ŞI EFECTELE ACESTUIA

Heliul este un element rar, găsit în aerul atmosferic numai în proporţie de 1:200000. Heliul a fost descoperit în anul 1868, prin analiza spectrografică a Soarelui de unde şi numele de Helios, numele grecesc al Soarelui. Heliul este de 70 de ori mai uşor decât aerul şi a fost folosit, la începutul secolului XX, pentru umplerea baloanelor şi a dirijabilelor. Heliul se găseşte în cantităţi ceva mai mari în gazele naturale din unele zone din S.U.A., Canada şi Federaţia Rusă.

1.2.3.1. Caracteristicile heliului

Heliul este un gaz monoatomic, incolor, inodor şi insipid. Este total inert, atât de inert încât nu se combină nici cu el însuşi. Este un gaz insolubil în apă. În tabelul 1.8 sunt prezentate cele mai importante caracteristici fizice ale heliului.

În scufundare, heliul se foloseşte ca diluant al oxigenului. Heliul are dezavantajele unei distorsionări a spectrului sonor provocând fenomenul cunoscut sub numele de *efectul Donald Duck* şi unei foarte ridicate conductibilităţi termice, ceea ce cauzează răcirea rapidă a organismului prin intermediul respiraţiei.

Ideea folosirii heliului ca înlocuitor al azotului în amestecurile respiratorii, pentru eliminarea efectului narcotic al acestuia din urmă, aparţine lui Edgar End, internist la spitalul din Milwaukee County, Wisconsin, SUA şi datează din anul 1937. Acesta, împreună cu un scafandru, Max Gene Nohl, au respirat un amestec binar heliu-oxigen într-o barocameră a spitalului, la adâncimea de 30 m. După acest experiment a urmat o serie de scufundări în lacul Michigan la adâncimi tot mai mari. În final, utilizând aparatul autonom al lui Nohl, Frank Crilley a stabilit un nou record mondial, în decembrie 1937, scufundându-se la 128 m adâncime.

Tabelul 1.8

Proprietăţile fizice ale heliului

Mărimea	Valoarea	Mărimea	Valoarea
Volumul molar $[m^3/kmol]$	22,43	$k/\mu c_v$	2,50
Masa molară $[kg/kmol]$	4,002	$D\rho/\mu$	-
Temperatura critică T_{cr} [K]	5,26	Constante Van der Waals: a – at/(*l*/mol)^2 b – *l*/mol	0,034 0,0236
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc. abs.) T_f [K]	4,26	Presiunea critică p_{cr} [ata]	2,26
Conductibilitatea termică k $[\mu cal/cm \cdot s \cdot K]$	352,0	T_f/T_{cr}	0,81
Coeficientul de autodifuzie $D[cm^2/s]$	-	Diametrul moleculei [Å]	2,17
Densitatea ρ [g/*l*]	0,1785	Solubilitatea în apă [*l*/*l*]	0,0088
Coeficientul dinamic de viscozitate μ[micropoise]	188,7	Solubilitatea în alcool etilic [*l*/*l*]	0,0281
Căldura specifică masică la volum constant c_v [cal/g K]	0,745	Solubilitatea în benzen [*l*/*l*]	0,0180

După aceste experimentări şi datorită faptului că nevoile operaţionale au impus lucrul sub apă la adâncimi tot mai mari, utilizarea heliului s-a generalizat, atingându-se adâncimea record de 686 m în cadrul programului ATLANTIS, printr-o scufundare efectuată de către americani la Duke University. Europenii, la rândul lor, au extins tehnologiile de pătrundere sub apă cu amestecuri heliu-oxigen. Astfel, tot mai multe state interesate în exploatarea mărilor şi oceanelor, anunţă performanţe în jurul adâncimii de 500 m, printre care Franţa, Anglia, Norvegia, Germania, România etc.

1.2.3.2. Efectele heliului asupra scafandrilor

Numeroşi cercetători, printre care Case şi Haldane, Marshale, Behnke, Bennett şi Brauer au efectuat corelaţii între proprietăţile gazelor inerte şi puterea lor narcotică. Toţi au fost de acord că heliul ocupă o poziţie privilegiată faţă de celelalte gaze inerte. Într-adevăr, dacă se iau în consideraţie polarizabilitatea diferitelor gaze inerte şi raportul acesteia la volumul molar, constanta *a* de atracţie intermoleculară (forţa Van der Waals), solubilitatea în lipide şi raportul solubilităţii în grăsimi şi apă, funcţie de teoria *coeficientului de partaj* a lui Mayer-Overton, prin care un anestezic are o putere narcotică cu atât mai mare cu cât este mai solubil în apă, heliul se află pe primul loc în ceea ce priveşte majoritatea proprietăţilor fizice. Hidrogenul şi neonul se află imediat după heliu şi înaintea azotului.

Presurizarea scafandrului cu amestecuri heliu-oxigen, induce, la adâncimi ce depăşesc 150…180 m, apariţia aşa numitului sindrom nervos al înaltelor presiuni (S.N.I.P.). Acest sindrom se traduce prin:

– tulburări motorii: tremur şi dismetrie, imprecizie şi necoordonare a gesturilor, pierderea echilibrului;
– scăderea nivelului de vigilenţă, tendinţe spre dezinteres, încetinire mintală şi somnolenţă;
– modificări electroencefalografice precare şi discrete la început, importante mai apoi, cu instalarea de trasee şi bufee de unde lente. Aceste trasee sunt îngrijorătorare pentru că nu corespund nici somnului normal nici celui antestezic.

Pentru ameliorarea S.N.I.P. au fost efectuate cercetări care s-au axat pe două direcţii:

– reducerea vitezelor de compresie (presurizare) a scafandrilor şi efectuarea de paliere de acomodare la diferite adâncimi considerate critice;
– injectarea de azot în amestecul repirator heliu-oxigen în proporţii de 5...20%, pentru a se profita de efectul narcotic al acestuia în ameliorarea S.N.I.P.

2.

AMESTECURI DE GAZE UTILIZATE LA APARATELE SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ

Amestecurile de gaze respiratorii sunt amestecuri gazoase cu două sau trei componente, o componentă fiind oxigenul, iar celelalte componente fiind gazele inerte. Aceste amestecuri rezultă din amestecarea, în proporţie dorită, a două sau trei din gazele prezentate în capitolul 1, unul dintre ele fiind întotdeauna oxigenul.

2.1. AMESTECURI RESPIRATORII BINARE ŞI TERNARE

După numărul componentelor principale din amestecurile respiratorii, acestea se împart în: amestecuri binare (cu două componente) şi amestecuri ternare (cu trei componente).

Amestecurile respiratorii binare cel mai des utilizate în domeniul pătrunderii omului sub apă, sunt amestecurile azot-oxigen, cunoscute sub denumirea de amestecuri NITROX şi amestecurile heliu-oxigen denumite amestecuri HELIOX. Pentru scufundările autonome, aceste tipuri de amestecuri sunt standardizate din punct de vedere al conţinutului de oxigen. Cele mai frecvente amestecuri respiratorii utilizate în scufundări autonome sunt cele caracterizate prin următoarele concentraţii ale oxigenului: 30% (uneori 32% sau 32,5%), 40%, 50% şi 60%, deci prin următoarele participaţii volumice ale oxigenului r_{O_2} în amestec: 0,30 (0,32 sau 0,325); 0,40; 0,50 şi 0,60. În ultimii ani se utilizează, în mod experimental, şi amestecuri binare hidrogen-oxigen (HIDROX) cu concentraţii ale oxigenului mai mici de 4% ($r_{O_2} < 0{,}04$).

Pentru scufundări cu amestecuri respiratorii se ţine seama nu numai de concentraţia oxigenului din amestec ci şi de natura gazului inert, din punct de vedere al efectelor lui narcotice.

Amestecurile respiratorii ternare (TRIMIX) utilizate frecvent la pătrunderea omului sub apă, sunt amestecuri heliu-azot-oxigen. Pentru scufundări autonome şi aceste amestecuri sunt standardizate. În general, concentraţiile heliului şi azotului sunt egale, iar concentraţia oxigenului este funcţie de limitele impuse la utilizarea acestuia. Amestecurile ternare se folosesc şi în scufundări profunde. La astfel de scufundări, se utilizează amestecurile HELIOX în care se injectează azot necesar pentru ameliorarea S.N.I.P., obţinându-se în acest fel amestecuri ternare cu concentraţii ale azotului de 5...10% ($r_{N_2} = 0{,}05...0{,}10$).

Amestecurile heliu-azot-oxigen se fabrică, de obicei, plecându-se de la heliu în care se adaugă aer comprimat. Presiunea parţială maximă admisibilă a azotului în amestec pentru evitarea oricăror forme de nacoză este cea corespunzătoare azotului din aerul respirat la 30 m adâncime ($p_{am} = p_{aer} = 4$ bar (sc. abs.)), adică $(p_{N_2})_{max} = r_{N_2} . p_{am} = 0{,}79 \cdot 4 = 3{,}16$ bar (sc. abs.).

În cadrul experimentărilor de laborator, se mai utilizează şi amestecuri ternare hidrogen-heliu-oxigen (HIDRELIOX).

2.2. FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII

Amestecurile gazoase binare sau ternare utilizate în scufundare se pot fabrica fie printr-o injecţie succesivă şi controlată a gazelor componente în recipiente cu volum constant, urmărindu-se presiunea din recipienţi, fie printr-o separare a azotului din aer pentru sărăcirea amestecului în azot, fie printr-o omogenizare continuă a gazelor componente, fie printr-o amestecare în flux continuu, cu injectarea simultană a gazelor componente la proporţia dorită, utilizându-se pentru aceasta dispozitive prevăzute cu ajutaje calibrate lucrând în domeniul critic (sonic), ce asigură livrarea componentelor gazoase la debite masice constante.

2.2.1. FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII BINARE

Amestecurile azot-oxigen (NITROX) se fabrică de obicei, prin injectarea aerului comprimat într-un recipient în care se află oxigen la o anumită presiune.

Amestecurile heliu-oxigen (HELIOX) se fabrică prin injectarea de oxigen într-un recipient în care se află heliu la o anumită presiune.

Amestecurile respiratorii de gaze se fabrică prin comprimarea gazelor componente în recipienţi cu volume cunoscute. Dacă se lucrează la temperatură constantă, cantităţile de gaz comprimate în recipient se pot determina prin măsurarea variaţiilor de presiune din recipient rezultate în urma injectării gazelor pure sau amestecurilor de gaze. Principalele instrumente de măsură necesare fabricării amestecurilor de gaze sunt manometrul cu clasă de precizie corespunzătoare şi analizorul de oxigen. La analiza oxigenului din amestecul fabricat trebuie să se ţină cont că acestuia îi sunt necesare minim 12 ore pentru o bună omogenizare, iar pentru măsurarea presiunii, după comprimarea gazelor în recipient, este necesară trecerea unui anumit interval de timp pentru ca temperatura amestecului să revină la temperatura ambiantă astfel încât să nu fie necesare corecţii de calcul rezultate din temperatură. Deci, amestecurile gazoase respiratorii se fabrică în recipienţi cu volume cunoscute şi la o temperatură constantă, repectiv temperatura ambiantă, ce permite aplicarea legii Boyle-Mariotte:

$$pV = \text{const.} \tag{2-1}$$

De asemenea, se ţine cont şi de legea lui Dalton care arată că, la o temperatură dată, presiunea unui amestec gazos p_{am} este egală cu suma presiunilor parţiale ale fiecărui gaz component p_{g_i} $(i = 1,2 \ldots n)$. Astfel, pentru un amestec de n gaze, legea lui Dalton se poate scrie:

$$p_{am} = \sum_{i=1}^{n} p_{g_i} = p_{g_1} + p_{g_2} + \ldots + p_{g_i} + \ldots + p_{g_n} \ , \qquad (2\text{-}2)$$

iar legea lui Amagat se scrie:

$$\sum_{i-1}^{n} r_{g_i} = r_{g_1} + r_{g_2} + \ldots + r_{g_i} + \ldots + r_{g_n} = 1. \qquad (2\text{-}3)$$

Presiunea parţială a unui gaz component dintr-un amestec de gaze se obţine prin înmulţirea presiunii amestecului de gaze cu participaţia volumică r_{g_i} a gazului component considerat:

$$p_{g_i} = p_{am}\, r_{g_i} \, . \qquad (2\text{-}4)$$

Pentru a se putea calcula mai uşor un amestec de gaze în vederea fabricării acestuia, se propune o schemă simplă. Astfel, se reprezintă recipientul în care se doreşte prepararea amestecului cu un dreptunghi (fig. 2.1) şi se presupune că gazele rămân stratificate fără să se amestece. Deci, în dreptunghiul "recipient" se poate reprezenta fiecare gaz component înscriind în fiecare compartiment gazul sau amestecul de gaze considerat. În dreapta dreptunghiului "recipient" se notează presiunile parţiale finale ale fiecărui gaz sau amestec gazos component $p_{g_i,f}$ şi presiunea finală a amestecului $p_{am},_f$ exprimate în scară manometrică, iar în stânga se notează participaţiile volumice $r_{g_i}^{(j)}$ ale gazului pur i din amestecurile injectate prin fiecare tranşă de injecţie (j), precum şi concentraţia finală dorită a acestui gaz $r_{g_i},_f$ din amestecul care este propus a fi obţinut în recipient.

Participaţii volumice pentru gazul g_i: Finală | Pe tranşă

Presiuni finale: Presiuni parţiale | Presiunea amestecului

Tranşa (n): $r_{g_1}^{(n)} + r_{g_2}^{(n)} + \ldots + r_{g_i}^{(n)} + \ldots + r_{g_n}^{(n)} = 1$ — $r_{g_i}^{(n)}$ — $p_{g_n},_f$

Tranşa (3): $r_{g_1}^{(3)} + r_{g_2}^{(3)} + \ldots + r_{g_i}^{(3)} + \ldots + r_{g_n}^{(3)} = 1$ — $r_{g_i}^{(3)}$ — $p_{g_3},_f$

Tranşa (2): $r_{g_1}^{(2)} + r_{g_2}^{(2)} + \ldots + r_{g_i}^{(2)} + \ldots + r_{g_n}^{(2)} = 1$ — $r_{g_i}^{(2)}$ — $p_{g_2},_f$

Tranşa (1): $r_{g_1}^{(1)} + r_{g_2}^{(1)} + \ldots + r_{g_i}^{(1)} + \ldots + r_{g_n}^{(1)} = 1$ — $r_{g_i}^{(1)}$ — $p_{g_1},_f$

$r_{g_i},_f$ — $p_{am},_f$

Fig. 2.1. Schema generală de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator de gaze.

Pe baza schemei din figura 2.1 şi a relaţiilor prezentate mai sus se poate exprima presiunea parţială finală a unui gaz component astfel:

$$p_{g_i,f} = p_{am,f}\, r_{g_i,f} = \\ = p_{g_1,f}\, r_{g_i}^{(1)} + p_{g_2,f}\, r_{g_i}^{(2)} + \ldots + p_{g_i,f}\, r_{g_i}^{(j)} + \ldots + p_{g_n,f}\, r_{g_i}^{(n)} \tag{2-5}$$

unde exponentul $(j)[(j) = (1),(2)\ldots(n)]$ reprezintă numărul tranşei de injecţie de gaze în recipient. Pentru o mai bună înţelegere, în cele ce urmează se prezintă câteva cazuri întâlnite mai des la fabricarea amestecurilor gazoase binare.

2.2.1.1. Fabricarea unui amestec binar NITROX pornind de la gaze pure: oxigen şi azot

Schema recipientului pentru calculul fabricării amestecului NITROX din gaze pure este prezentată în figura 2.2.

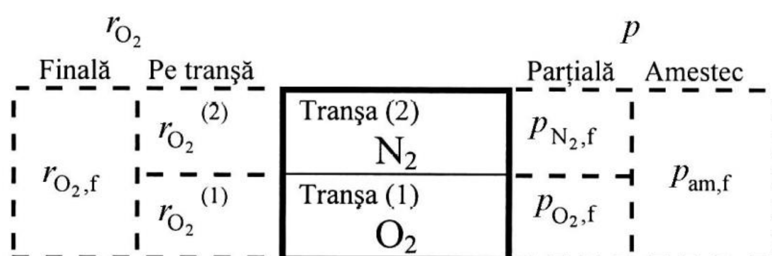


Fig. 2.2. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX pornind de la oxigen şi azot.

Pentru acest caz, relaţia (2-5) devine:

$$p_{O_2,f} = p_{am,f}\, r_{O_2,f} = p_{O_2,f}\, r_{O_2}^{(1)} + p_{N_2,f}\, r_{O_2}^{(2)}. \tag{2-6}$$

Astfel, calculul fabricării unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen şi 70% azot) la presiunea de 200 bar (sc. man.), se reduce la rezolvarea ecuaţiei scrise pe baza schemei de calcul din figura 2.3:

$$200 \cdot 0{,}3 = x \cdot 1 + (200 - x) \cdot 0\,, \tag{2-7}$$

de unde rezultă $x = 60$ bar (sc. man.) care reprezintă atât valoarea presiunii parţiale finale a oxigenului cât şi presiunea la sfârşitul primei tranşe de presurizare a recipientului prin injecţie de oxigen pur.

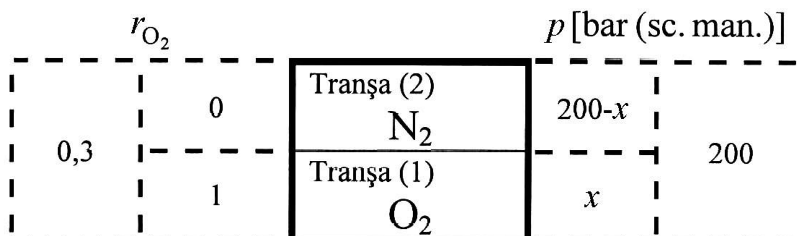


Fig. 2.3. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX 30/70 din oxigen şi azot.

Prin urmare, amestecul NITROX 30/70 la 200 bar (sc. man.) se va fabrica astfel: se presurizează recipientul mai întâi cu oxigen pur până când presiunea devine 60 bar (sc. man.), apoi se presurizează în continuare recipientul cu azot pur cu încă 140 bar, până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

2.2.1.2. Fabricarea unui amestec NITROX din oxigen şi aer

Având în vedere normele de tehnica securităţii muncii, este recomandabil să se evite manevrarea oxigenului pur la presiuni înalte, motiv pentru care, pentru fabricarea unui amestec binar NITROX din oxigen şi aer, se va proceda la injectarea de aer (21% oxigen şi 79% azot) în oxigenul stocat în recipient.

Astfel, pentru fabricarea unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen şi 70% azot) la presiunea de 200 bar (sc. man.), se va rezolva ecuaţia de mai jos, corespunzătoare schemei de calcul din figura 2.4:

$$p_{am,f}\ r_{N_2,f} = p_{O_2,f}\ r_{N_2}^{(1)} + p_{aer,f}\ r_{N_2}^{(2)}, \tag{2-8}$$

adică:

$$200 \cdot 0{,}7 = (200 - x) \cdot 0 + x \cdot 0{,}79, \tag{2-9}$$

de unde rezultă $x = 177{,}2$ bar (sc. man.).

Deci, amestecul NITROX 30/70 la 200 bar (sc. man.) se va fabrica astfel: se presurizează mai întâi cu oxigen pur până când presiunea devine 200-177,2 = 22,8 bar (sc. man.), după care se continuă presurizarea cu încă 177,2 bar cu aer, până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

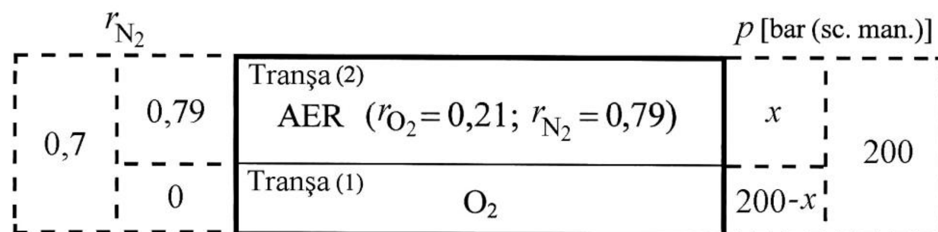


Fig. 2.4. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX 30/70 din oxigen şi aer.

Deoarece amestecurile respiratorii binare NITROX sunt cele mai utilizate în scufundările industriale, dar mai ales în cele cu scop militar şi datorită faptului că metoda fabricării acestor amestecuri prin injectare succesivă de oxigen şi aer este cea mai utilizată, în tabelul 2.1 se prezintă variaţiile de presiune rezultate prin cele două tranşe de presurizare, mai întâi cu oxigen şi apoi cu aer, în vederea obţinerii amestecurilor respiratorii binare NITROX, la o presiune finală de 200 bar (sc. man.).

Tabelul 2.1

Fabricarea amestecurilor NITROX prin injectarea succesivă de oxigen şi aer

Amestec NITROX [%O_2 / %N_2]	Presiunea din recipient după presurizarea cu oxigen pur [bar (sc. man.)]	Creşterea de presiune prin presurizarea cu aer [bar]	Presiunea finală a amestecului [bar (sc. man)]
60/40	98,7	101,3	200
50/50	73,4	126,6	200
40/60	48,1	151,9	200
32,5/67,5	29,1	170,9	200
32/68	27,8	172,2	200
30/70	22,8	177,2	200

La fabricarea amestecurilor NITROX se utilizează oxigen cu puritate ridicată (minimum 99,5% O_2) şi aer respirator corespunzător normativelor în vigoare (21% O_2 şi 79% N_2).

2.2.1.3. Fabricarea unui amestec HELIOX din heliu şi oxigen

Datorită diferenţei mari de densitate dintre cele două gaze, întotdeauna se injectează oxigenul peste heliu şi aceasta cât mai violent posibil pentru a se realiza o mai bună omogenizare a amestecului. Spre exemplu, pentru fabricarea unui amestec HELIOX 20/80 (20% oxigen şi 80% heliu) la 200 bar (sc. man.), schema recipientului va fi cea din figura 2.5, iar ecuaţia corespunzătoare va fi:

$$p_{am,f} \; r_{O_2,f} = p_{He,f} \; r_{O_2}^{(1)} + p_{O_2,f} \; r_{O_2}^{(2)}, \tag{2-10}$$

adică:

$$200 \cdot 0{,}2 = (200 - x) \cdot 0 + x \cdot 1, \tag{2-11}$$

de unde rezultă $x = 40$ bar (sc. man.).

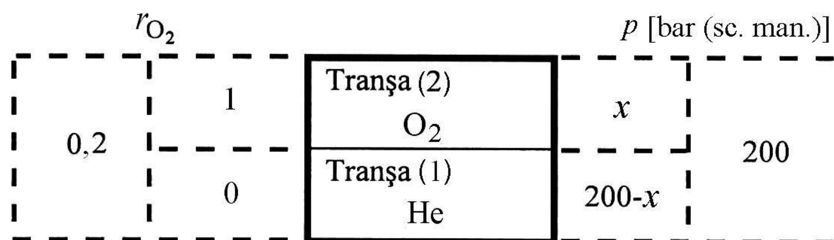


Fig. 2.5. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator HELIOX 20/80 din heliu şi oxigen.

Prin urmare, amestecul HELIOX 20/80 la 200 bar (sc. man.) se va fabrica astfel: se presurizează recipientul mai întâi cu heliu pur până la presiunea 200 – 40 = 160 bar (sc. man.), iar, în continuare, se continuă presurizarea cu încă 40 bar cu oxigen pur până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

2.2.1.4. Fabricarea unui amestec HELIOX din alte amestecuri HELIOX şi gaze pure

Metoda de fabricare a unui amestec HELIOX din alt amestec HELIOX, se utilizează atunci când se doreşte economisirea heliului. Spre exemplu, se consideră un amestec HELIOX 10/90 (10% O_2 şi 90% He) aflat într-un recipient la presiunea de 20 bar (sc. man.) şi un amestec HELIOX 14/86 (14% O_2 şi 86% He) aflat într-un alt recipient la presiunea de 160 bar (sc. man.) şi se doreşte ca să se fabrice un amestec HELIOX 12/88 (12% O_2 şi 88% He) la 200 bar (sc. man.). Iniţial, nu se cunoaşte dacă trebuie adăugat heliu sau oxigen pur şi, de aceea, schema iniţială a recipientului de calcul va fi cea din figura 2.6, iar ecuaţia corespunzătoare va fi:

$$200 \cdot 0{,}12 = x \cdot 1 + 160 \cdot 0{,}14 + (200 - 160 - 20 - x) \cdot 0 + 20 \cdot 0{,}10 \tag{2-12}$$

de unde rezultă $x = -0{,}4$, lucru imposibil. De aceea, se revine asupra schemei recipientului, renunţându-se la injectarea oxigenului. Schema recipientului de calcul va fi cea din figura 2.7, iar ecuaţia corespunzătoare va fi:

$$200 \cdot 0{,}12 = x \cdot 0{,}14 + (200 - 20 - x) \cdot 0 + 20 \cdot 0{,}10 \tag{2-13}$$

de unde rezultă $x = 157{,}14$ bar (sc. man.)

r_{O_2}		p [bar (sc. man.)]
1	O_2	x
0,14	HELIOX 14/86 (r_{O_2}=0,14, r_{He}=0,86)	160
0	He	200-160-20-x
0,10	HELIOX 10/90 (r_{O_2}=0,10, r_{He}=0,90)	20
0,12 (total)		200 (total)

Fig. 2.6. Schema iniţială de calcul pentru fabricarea unui amestec HELIOX 12/88 din alte amestecuri HELIOX şi gaze pure.

r_{O_2}		p [bar (sc. man.)]
0,14	HELIOX 14/86 (r_{O_2}=0,14, r_{He}=0,86)	x
0	He	200 - 20 - x
0,10	HELIOX 10/90 (r_{O_2}=0,10, r_{He}=0,90)	20
0,12 (total)		200 (total)

Fig. 2.7. Schema finală de calcul pentru fabricarea unui amestec HELIOX 12/88 din alte amestecuri HELIOX şi gaze pure.

Deci, amestecul HELIOX 12/88 la 200 bar (sc. man.) se obţine astfel: recipientul conţinând amestecul HELIOX 10/90 la presiunea de 20 bar (sc. man.) se presurizează, în continuare, cu încă 200 - 20 - 157,14 = 22,86 bar (sc. man.), cu heliu pur, după care se continuă presurizarea cu încă 157,14 bar (sc. man.) cu amestc HELIOX 14/86 până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

2.2.2. FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII TERNARE

Pentru fabricarea amestecurilor ternare se aplică aceeaşi metodă ca cea prezentată la fabricarea amestecurilor binare. Astfel, pentru fabricarea amestecurilor ternare heliu-azot-oxigen (TRIMIX) se pot utiliza fie heliu şi aer, fie heliu şi amestec binar azot-oxigen (NITROX). În primul caz se presurizează mai întâi recipientul cu heliu, apoi se continuă presurizarea cu aer. În al doilea caz, se fabrică mai întâi amestecul binar NITROX care apoi se injectează în recipient peste heliu.

2.3. CORECTAREA AMESTECURILOR DE GAZE

Indiferent de metoda utilizată pentru fabricarea amestecurilor de gaze, este necesar controlul permanent al participaţiilor gazelor componente ale amestecurilor cu ajutorul unor analizoare de gaze specializate şi corectarea acestora în vederea obţinerii amestecurilor dorite.

Corectarea amestecurilor respiratorii de gaze se face după analiza lor din punct de vedere al concentraţiei de oxigen. În cele ce urmează se vor prezenta patru cazuri de corecţie a amestecurilor respiratorii.

2.3.1. CORECTAREA UNUI AMESTEC HELIOX PREA SĂRAC ÎN OXIGEN

Se consideră că se dispune de un amestec HELIOX 10/90 (10% O_2 şi 90% He) aflat într-un recipient la presiunea de 180 bar (sc. man.) şi se doreşte corectarea acestuia pentru obţinerea unui amestec HELIOX 12/88 (12% O_2 şi 88% He). În acest caz nu se cunoaşte presiunea finală a amestecului dorit. Schema recipientului este cea din figura 2.8, iar ecuaţia corespunzătoare va fi:

$$x \cdot 0{,}88 = 180 \cdot 0{,}9 + (x - 180) \cdot 0, \qquad (2\text{-}14)$$

de unde rezultă x = 184 bar (sc. man.)

Prin urmare, amestecul HELIOX 12/88 se obţine astfel: peste amestecul HELIOX 10/90 aflat la 180 bar (sc. man.) se injectează 4 bar (sc. man.) oxigen pur, până când presiunea ajunge la valoarea finală de 184 bar (sc. man.).

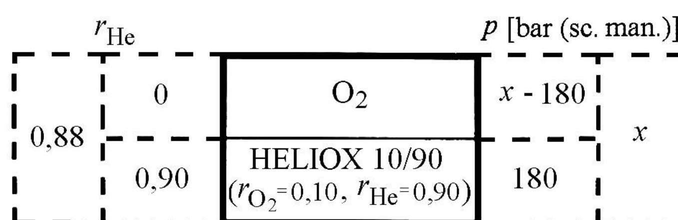


Fig. 2.8. Schema de calcul privind corectarea amestecului HELIOX 10/90 pentru obţinerea amestecului HELIOX 12/88.

2.3.2. CORECTAREA UNUI AMESTEC HELIOX PREA BOGAT ÎN OXIGEN

Datorită diferenţei mari de densitate dintre heliul pur şi un amestec HELIOX, întotdeauna amestecul HELIOX se va injecta peste heliul aflat în recipient.

Spre exemplu, se consideră un amestec HELIOX 12/88 (12% O_2 şi 88% He) la presiunea de 150 bar (sc. man.) şi se doreşte corectarea acestuia în vederea obţinerii unui amestec HELIOX 10/90 (10% O_2 şi 90% He). Şi în acest caz nu se cunoaşte presiunea finală a amestecului dorit. Pentru o astfel de corectare pot fi folosite două variante: varianta utilizării unui compresor şi a unei başe recuperatoare şi varianta utilizării unui surpresor.

a. *Dacă pentru fabricarea amestecului se foloseşte un compresor şi o başă recuperatoare*, se poate utiliza întregul amestec HELIOX şi schema recipientului de calcul este prezentată în figura 2.9.

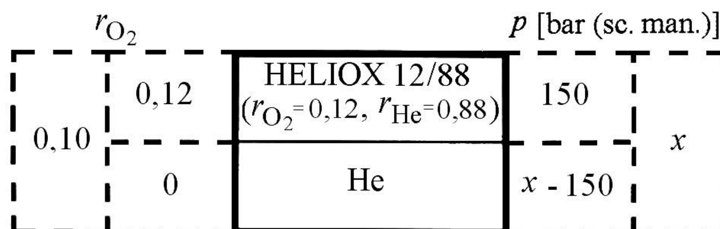


Fig. 2.9. Schema de calcul pentru fabricarea amestecului HELIOX 10/90 prin corectarea unui amestec HELIOX 12/88 (cazul utilizării unui compresor şi a unei başe recuperatoare).

Se poate scrie ecuaţia corespunzătoare acestui caz:

$$x \cdot 0{,}10 = 150 \cdot 0{,}12 + (x - 150) \cdot 0, \qquad (2\text{-}15)$$

de unde rezultă x = 180 bar (sc. man.)

Deci, în acest caz, pentru obţinerea amestecului HELIOX 10/90 se procedează astfel: într-un recipient cu heliu la 30 bar (sc. man.) se vor injecta 150 bar (sc. man.) amestec HELIOX 12/88, deci până presiunea finală din recipient devine 180 bar (sc. man.).

b. *Dacă pentru fabricarea amestecului se foloseşte un surpresor* care aspiră de la 20 bar (sc. man.) atunci din amestecul HELIOX 12/88 se pot utiliza numai 130 bar (sc. man.), iar schema de calcul este arătată în figura 2.10.

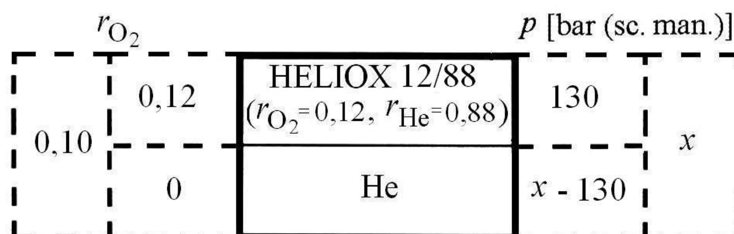


Fig. 2.10. Schema de calcul pentru fabricarea amestecului HELIOX 10/90 prin corectarea unui amestec HELIOX 12/88 (cazul utilizării unui surpresor).

Se poate scrie ecuaţia pentru acest caz:

$$x \cdot 0{,}10 = 130 \cdot 0{,}12 + (x - 130) \cdot 0, \qquad (2\text{-}16)$$

de unde rezultă x = 156 bar (sc. man.).

Deci, în acest caz, pentru obţinerea amestecului HELIOX 10/90 se procedează astfel: într-un recipient cu heliu la 26 bar (sc. man.) se vor injecta 130 bar (sc. man.) amestec HELIOX 12/88, până când presiunea finală din recipient devine 156 bar (sc. man.)

2.3.3. CORECTAREA UNUI AMESTEC NITROX PREA SĂRAC ÎN OXIGEN

În principiu, ar trebui injectat oxigen în amestecul NITROX iniţial dar, din motive de protecţia muncii este preferabil să se injecteze amestecul NITROX iniţial peste oxigen.

Spre exemplu, se consideră un amestec NITROX 30/70 (30% O_2 şi 70% N_2) aflat la presiunea de 160 bar (sc. man.) şi se doreşte realizarea unui amestec NITROX 40/60 (40% O_2 şi 60% N_2). Schema de calcul este prezentată în figura 2.11.

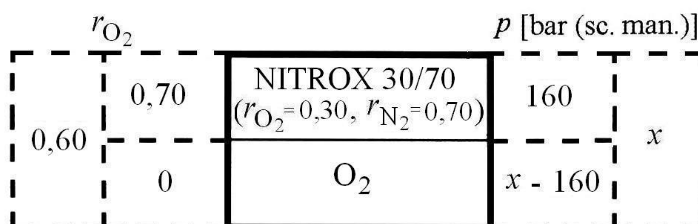


Fig. 2.11. Schema de calcul pentru fabricarea amestecului NITROX 40/60 prin corectarea unui amestec NITROX 30/70.

Ecuaţia caracteristică a acestui caz este:

$$x \cdot 0{,}60 = 160 \cdot 0{,}70 + (x - 160) \cdot 0, \qquad (2\text{-}17)$$

de unde rezultă x = 186 bar (sc. man.)

Prin urmare, amestecul NITROX 40/60 se obţine astfel: într-un recipient cu oxigen aflat la presiunea de 26 bar (sc. man.), se injectează 160 bar (sc. man.) de amestec NITROX 30/70 până când presiunea din recipient devine egală cu 186 bar (sc. man.).

2.3.4. CORECTAREA UNUI AMESTEC NITROX PREA BOGAT ÎN OXIGEN

Pentru efectuarea unei astfel de corectări, s-ar putea injecta azot în amestecul iniţial de NITROX prea bogat în oxigen dar, din motive de economie, se preferă injectarea de aer, acesta fiind oricând la dispoziţie.

Spre exemplu, se consideră că se dispune de un amestec NITROX 40/60 (40% O_2 şi 60% N_2) la presiunea de 130 bar (sc. man.) şi se doreşte realizarea unui amestec NITROX 30/70 (30% O_2 şi 70% N_2).

Schema de calcul pentru acest caz este prezentată în figura 2.12.

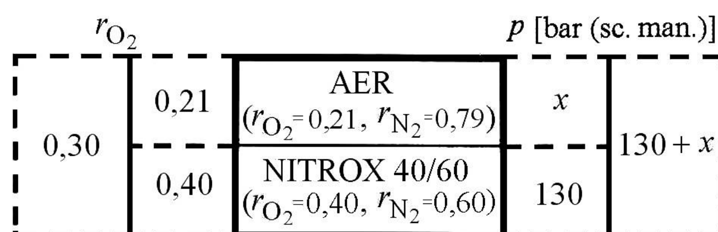


Fig. 2.12. Schema iniţială de calcul pentru fabricarea amestecului NITROX 30/70 prin corectarea unui amestec NITROX 40/60.

Ecuaţia caracteristică acestui caz este:

$$(130 + x) \cdot 0{,}30 = x \cdot 0{,}21 + 130 \cdot 0{,}40, \qquad (2\text{-}18)$$

de unde rezultă x = 144 bar (sc. man.). Presiunea finală ar fi 130 + 144 = 274 bar (sc. man.), aceasta depăşind presiunea maximă admisibilă a recipientului. De aceea, datele problemei vor fi modificate, impunându-se presiunea finală a amestecului dorit de 196 bar (sc. man.) şi, pentru acest caz, noua schemă de calcul este prezentată în figura 2.13.

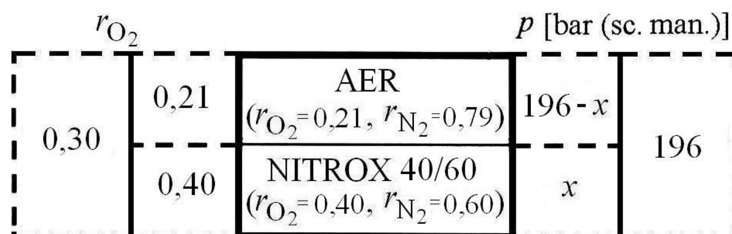


Fig. 2.13. Schema finală de calcul pentru fabricarea amestecului NITROX 30/70 prin corectarea unui amestec NITROX 40/60.

Pentru noua schemă de calcul se poate scrie ecuaţia:

$$196 \cdot 0{,}30 = (196 - x) \cdot 0{,}21 + x \cdot 0{,}40, \qquad (2\text{-}19)$$

de unde rezultă x = 93 bar (sc. man.).

Prin urmare, pentru fabricarea amestecului NITROX 30/70 va trebui să se transvazeze sau să renunţe la 130 – 93 = 37 bar (sc. man.) din amestecul NITROX 40/60 pentru a se putea face corecţia impusă. Apoi, peste amestecul NITROX 40/60 aflat la 93 bar (sc. man.) se injectează 196 – 93 = 103 bar (sc. man.) aer până când presiunea finală din recipient devine egală cu 196 bar (sc. man.).

2.4. PROCEDEE ŞI INSTALAŢII PENTRU PREPARAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII

Pentru prepararea amestecurilor binare şi ternare de gaze, pot fi utilizate mai multe procedee. În continuare, se prezintă câteva procedee întâlnite mai des în prepararea amestecurilor gazoase utilizate pentru aparatele de respirat sub apă speciale.

2.4.1. PROCEDEU ŞI INSTALAŢIE DE PREPARARE A AMESTECULUI RESPIRATOR NITROX PRIN INJECŢIE SUCCESIVĂ DE OXIGEN ŞI AER

Procedeul de preparare a amestecului respirator NITROX prin injecţie succesivă de oxigen şi aer, presupune injectarea de oxigen pur într-o butelie de scufundare unde, mai apoi, este introdus aer comprimat „curat”, numit şi aer compatibil cu oxigenul (Oxygen Compatible Air) realizându-se astfel amestecul dorit. Trebuie spus că termenul „curat” este o noţiune relativă, calitatea aerului respirabil fiind stabilită în standarde precum CGA Grade E, BS4275 sau DIN 3188.

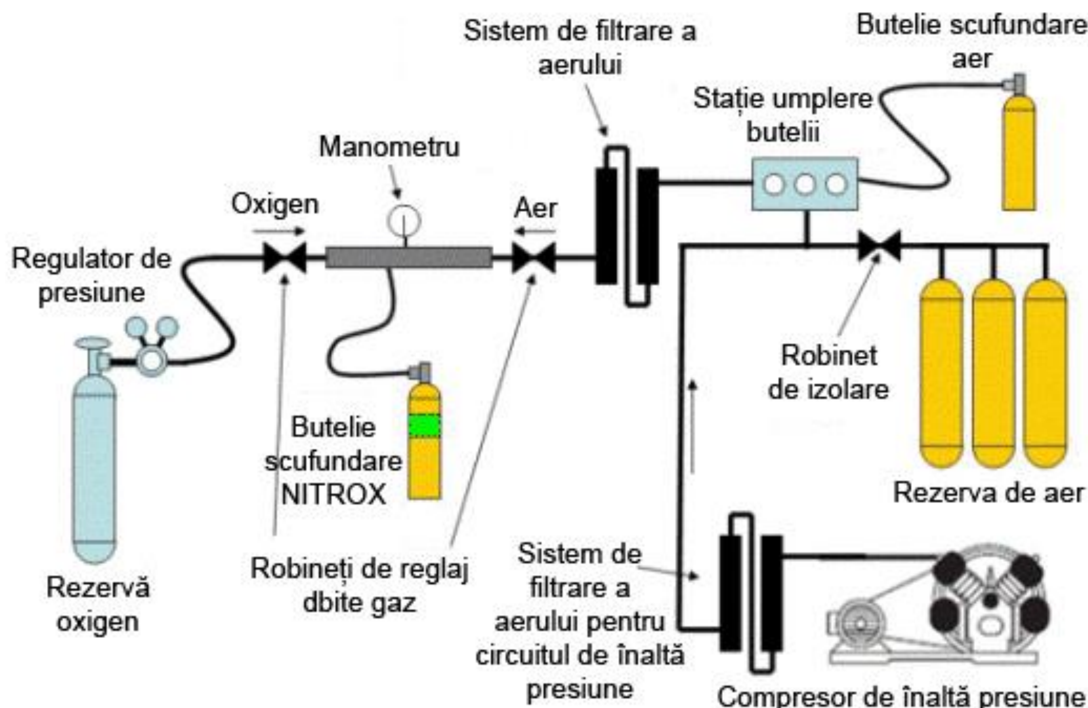


Fig. 2.14. Schema instalaţiei de prepararea a amestecurilor NITROX prin procedeul bazat pe injecţie succesivă de oxigen şi aer.

În ceea ce priveşte noţiunea de „compatibilitate” a aerului comprimat folosit la preparerea amestecurilor NITROX, aceasta se referă la o serie de criterii operaţionale

legate de amestecarea aerului cu oxigen pur sau cu un amestec bogat în oxigen. Trebuie menţionat faptul că nu există un standard unic legat de calitatea aerului utilizat la crearea amestecurilor NITROX.

În anul 1992 agenţiile de formare în domeniul scufundărilor şi alte agenţii guvernamentale din S.U.A., la întâlniarea din Orlando, Florida, au căzut de acord asupra unui set de standarde privind aerul compatibil cu oxigenul. Aceste standarde reprezintă o aprobare unanimă bazată pe cunoaştere, experienţă şi tehnologiile disponibile la acea dată.

În figura 2.14 este prezentată, schematic, o instalaţie pentru prepararea amestecurilor NITROX prin procedeul bazat pe injecţie succesivă de oxigen şi aer.

Avantajele acestui procedeu de preparare sunt:

- costuri iniţiale reduse;
- capabil să producă amestecuri cu orice procentaj.

Dezavantajele procedeului sunt:

- procesul de încărcare al buteliilor necesită un volum mare de muncă şi este lent, circa 20 ... 30 minute o butelie;
- buteliile şi sistemul de umplere trebuie să respecte normele privind puritatea oxigenului;
- potenţial periculos în cazul în care în butelie ajunge în mod accidental ulei (efect diesel ce duce la explozie);
- nu se poate folosi întrega cantitate de oxigen din butelia ce înmagazinează acest gaz; pentru a depăşi acest neajuns este nevoie de o pompă specială (booster);
- realizarea corectă şi precisă a amestecului depinde de priceperea operatorului instalaţiei este nevoie să se prevadă un stoc de butelii cu oxigen.

2.4.2. PROCEDEU ŞI INSTALAŢIE DE PREPARARE A AMESTECULUI RESPIRATOR NITROX PRIN INJECŢIE SUCCESIVĂ ÎN DOUĂ ETAPE

Pentru exemplificarea modului concret în care se fabrică amestecurile respiratorii prin *procedeul de preparare a amestecului respirator NITROX prin injecţie succesivă în două etape*, în figura 2.15 se prezintă schema unei instalaţii pentru fabricarea de amestecuri NITROX prin injecţie succesivă în două etape în vederea încărcării cu acest amestec a buteliilor aparatelor de respirat sub apă speciale.

Instalaţia este alcătuită, în primul rând, dintr-un *compresor de aer*, la ieşirea căruia s-a prevăzut un *element de filtrare suplimentar* pentru eliminarea tuturor urmelor de ulei. De aici, aerul sub presiune este trimis la tabloul de manevră şi control (fig. 2.16). Acesta comportă şi o a doua intrare şi anume intrarea oxigenului pur furnizat de *butelii de oxigen* de 50 l cu oxigen stocat la 200 bar (sc. man.). Cele două circuite, echipate cu robinete şi clapete anti-retur, duc la un ansamblu de *butelii tampon* (fig. 2.17) unde se stochează amestecul NITROX primar 40/60 (40% oxigen şi 60% azot) obţinut prin amestecare de oxigen şi aer. Trebuie menţionat faptul că doar partea de circuit cuprinsă între buteliile de oxigen pur şi buteliile tampon de NITROX 40/60 trebuie degresate conform normelor de lucru cu oxigen, prin restul circuitelor de umplere,

între buteliile tampon şi *buteliile de scufundare*, circulând amestecuri NITROX cu un procentaj de oxigen de până la 40%, deci fără risc.

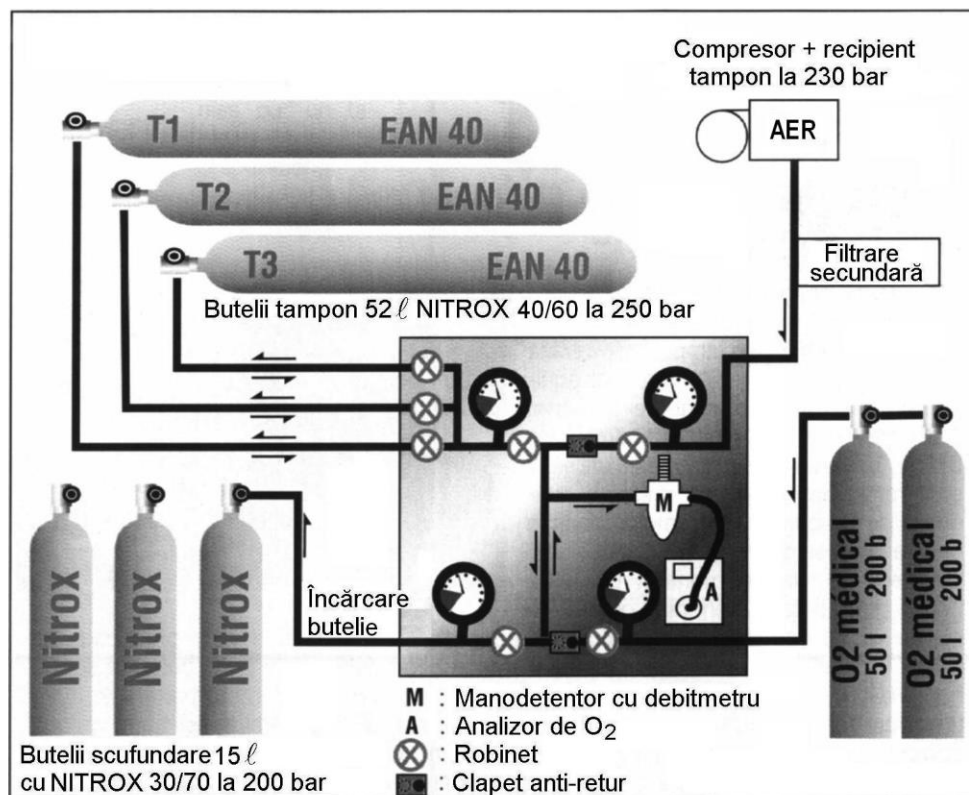


Fig. 2.15. Schema unei instalaţii de fabricare de amestecuri NITROX pentru încărcarea buteliilor de scafandru.

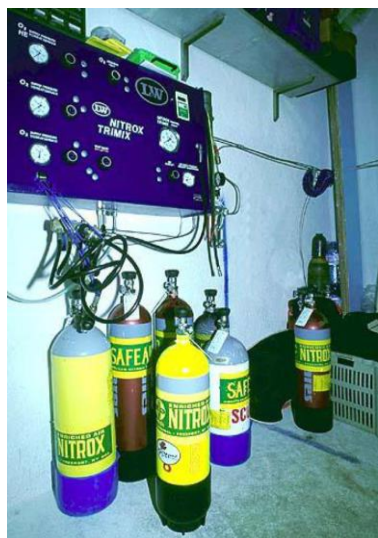


Fig. 2.16. Tabloul de manevră şi control al instalaţiei de preparare a amestecurilor NITROX.



Fig. 2.17. Buteliile tampon pentru stocarea de amestec NITROX primar 40/60.

În continuare, se prezintă un exemplu concret de preparare a unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen şi 70% azot) în buteliile de scufundare ce trebuie

umplute cu acest amestec la presiunea de 200 bar (sc. man.). Prepararea acestui amestec se face în două etape:

– în prima etapă se fabrică amestecul primar NITROX 40/60 din oxigen şi aer în buteliile tampon la 250 bar (sc. man.), ecuaţia corespunzătoare fiind:

$$250 \cdot 0{,}6 = (250 \cdot x) \cdot 0 + x \cdot 0{,}79, \qquad (2\text{-}20)$$

de unde rezultă $x \cong 190$ bar (sc. man.); prin urmare, amestecul NITROX 40/60 la 250 bar (sc. man.) se prepară astfel: se presurizează buteliile tampon mai întâi cu oxigen pur livrat din buteliile de oxigen până când presiunea din buteliile tampon devine 250 – 190 = 60 bar (sc. man.), după care, cu ajutorul compresorului de aer se continuă presurizarea cu încă 190 bar cu aer comprimat, până când presiunea amestecului din buteliile tampon devine egală cu 250 bar (sc. man.); astfel, s-a obţinut în buteliile tampon un amestec primar NITROX 40/60, la presiunea de 250 bar (sc. man.); această primă serie de operaţiuni se va relua de fiecare dată când este necesar să se obţină o rezervă suficientă de NITROX 40/60 la o presiune superioară presiunii de 150 bar (sc. man.), caz limită de umplere cu NITROX a buteliilor de scufundare;

– în a doua etapă, se prepară amestecul NITROX definitiv în buteliile de scufundare la procentajul de oxigen dorit, pornind la amestecul NITROX primar; pentru exemplificare se prezintă cazul în care se doreşte prepararea unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen şi 70% azot) la presiunea de 200 bar (sc. man.), în buteliile de scufundare, prin corectarea amestecului NITROX 40/60 cu aer comprimat furnizat de compresor; procedura este cea privind corectarea unui amestec NITROX prea bogat în oxigen, ecuaţia caracteristică fiind:

$$200 \cdot 0{,}30 = (200 - x) \cdot 0{,}21 + x \cdot 0{,}40, \qquad (2\text{-}21)$$

de unde rezultă $x \cong 95$ bar (sc. man.); prin urmare, pentru fabricarea amestecului NITROX 30/70 la 200 bar (sc. man.), se presurizează butelia de scufundare cu amestec NITROX 40/60 din buteliile tampon, până când presiunea din butelia de scufundare devine egală cu 95 bar (sc. man.), după care, cu ajutorul compresorului se injectează în butelia de scufundare 200 – 95 = 105 bar aer comprimat, până când presiunea din butelia de scufundare devine egală cu 200 bar (sc. man.); astfel, în butelia de scufundare s-a obţinut un amestec NITROX 30/70 la presiunea dorită de 200 bar (sc. man.).

Cu aceeaşi instalaţie, se pot prepara şi amestecuri NITROX la un procentaj de oxigen superior lui 40% (în acest caz, toată instalaţia şi buteliile de scufundare trebuie degresate). Astfel, este suficient de a injecta în buteliile de scufundare oxigen pur din buteliile de oxigen şi apoi de a completa, prin injectare de amestec primar NITROX 40/60, până la presiunea dorită, urmând procedura de corectare a unui amestec NITROX prea sărac în oxigen.

Fiecare dintre circuite este echipat cu câte un *manometru cu clasă superioară* de precizie, pentru a se asigura prepararea unui amestec cu concentraţie volumică de oxigen cât mai exactă. Tabloul de manevră şi control mai este echipat cu un *manodetentor* şi cu un *analizor de oxigen* care permite controlarea amestecului preparat în fiecare butelie de scufundare. De asemenea, se mai poate utiliza un analizor de mână ce poate fi branşat la ieşirea fiecăreia dintre buteliile de scufundare. În cazul în care analizorul de oxigen este integrat tabloului de manevră şi control, trebuie purjat circuitul de analiză pentru fiecare butelie controlată.

Pentru prepararea locală de amestecuri respiratorii binare sau ternare se pot utiliza instalaţii portabile (fig. 2.18) de mici dimensiuni care cuprind un *tablou de control* de mici dimensiuni sub forma unei valize, prevăzut cu trei branşamente: primul este pentru intrare oxigen pur de la o *butelie de oxigen medical*, al doilea este pentru intrare aer comprimat de la un *compresor portabil* şi al treilea pentru ieşire gaze către *butelia de scufundare*. Fiecare circuit este echipat cu câte un manometru, umplerea buteliei de scufundare fiind reglată printr-un manometru de precizie, de preferinţă digital.

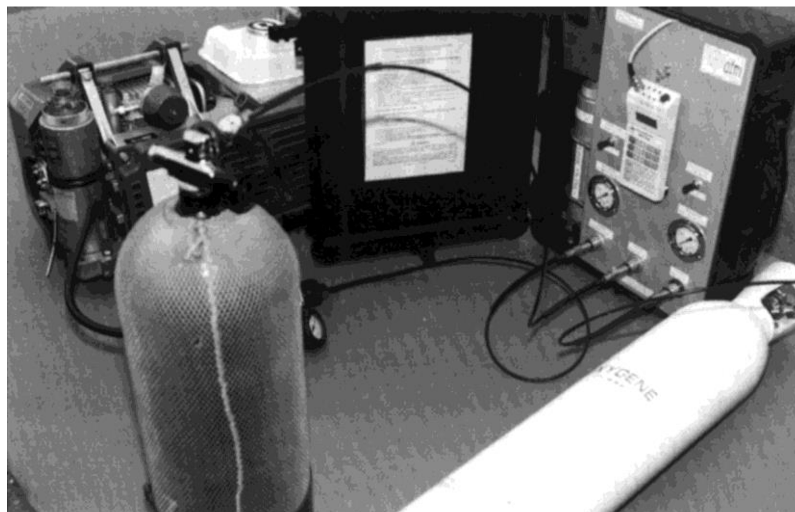


Fig. 2.18. Instalaţie portabilă pentru prepararea locală a amestecurilor respiratorii.



Fig. 2.19. Instalaţie pentru prepararea unor cantităţi mari de amestecuri respiratorii.

Pentru prepararea de amestecuri respiratorii binare sau ternare în cantitate mare şi foarte mare care să asigure stocaje importante de amestecuri pentru scufundări colective în sisteme hiperbare specializate, se vor utiliza *instalaţii de fabricare a amestecurilor respiratorii de mari dimensiuni* aşa cum este cea prezentată în figura 2.19.

2.4.3. PROCEDEU ŞI INSTALAŢIE DE PREPARARE A AMESTECULUI RESPIRATOR NITROX PRIN SEPARAREA AZOTULUI CU AJUTORUL MEMBRANELOR

Procedeul de preparare a amestecului respirator NITROX prin separarea azotului cu ajutorul membranelor, a cărui instalaţie este prezentată în figura 2.21, a fost utilizat iniţial în industria sudurii pentru producerea azotului. Presupune utilizarea unei surse de aer furnizat la o presiune redusă. Curentul de aer format este dirijat printr-un dispozitiv de separare cu membrane (fig. 2.20). Membranele sunt de două tipuri, una destinată trecerii azotului, iar cealaltă pentru permeat (amestec NITROX îmbogăţit în oxigen) care este distribuit compresorului de înaltă presiune.

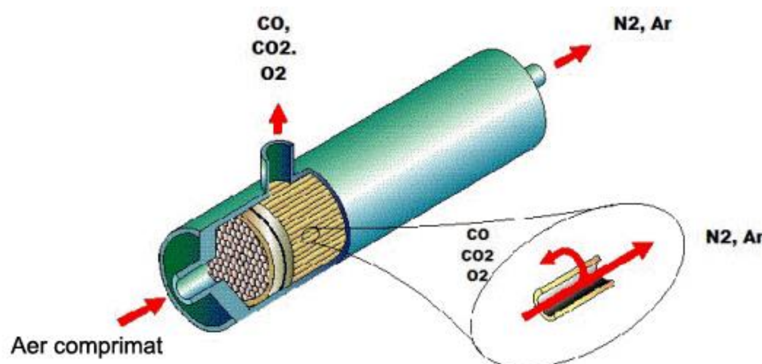


Fig. 2.20. Dispozitiv de separare cu membrane.

Conţinutul de oxigen este reglat fie prin modificarea presiunii de furnizare către membrane, fie prin reglarea deschiderii destinată trecerii azotului. Funcţionarea optimă a sistemului de membrane se realizează după circa 30 de minute de la punerea în funcţiune.

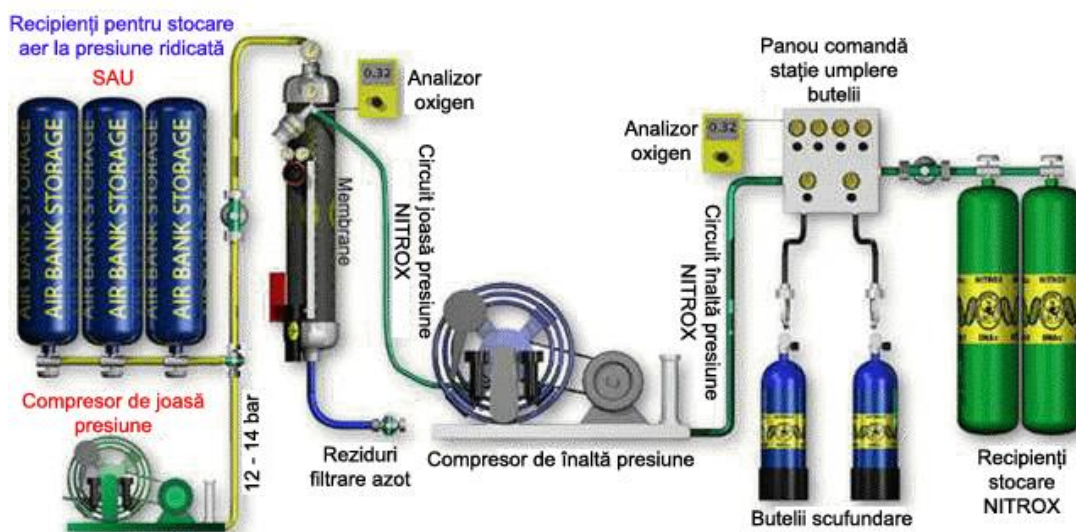


Fig. 2.21. Schema instalaţiei de prepararea a amestecurilor NITROX prin procedeul de separare a azotului cu ajutorul membranelor.

Compresorul de înaltă presiune este conectat fie direct la buteliile utilizate pentru scufundări, fie la recipienţii de stocare a amestecului binar NITROX.

Avantajele procedeului de preparare a amestecului sunt:

- nu necesită oxigen stocat în butelii (independenţă faţă de producătorii de oxigen);
- se poate fabrica amestec NITROX în condiţii de siguranţă (pâna la 40%);
- sistemul de umplere şi buteliile nu trebuie să respecte condiţii legate de necesitatea absenţei oxigenului în fază iniţială.

Dezavantajele procedeului sunt:

- costuri de achiziţie mari;
- punerea în funcţiune a sistemului este greoaie, iar explorarea acestuia este dificilă; reglarea amestecului de oxigen este greu de realizat; aerul încălzit ce intră în contact cu membrana provoacă o reacţie chimică în senzorul de oxigen ce duce la decalibrarea analizorului de oxigen;
- costuri adiţionale (electricitate/mentenanţă) asociate operării compresorului de joasă presiune ce asigură aerul către sistemul de membrane;
- dacă, în locul compresorului de joasă presiune, sistemul de membrane este alimentat de la recipienţi sub presiune pentru stocarea aerului atunci, ca urmare a creşterii consumului de energie electrică, cheltuielile de exploatare cresc şi uzura compresorului de înaltă presiune, care în această situaţie produce aerul comprimat, este în acest caz mai mare;
- dacă filtrele pentru îmbunătăţirea calităţii aerului nu sunt schimbate la timp atunci este posibil ca membranele să se colmateze cu particule fapt ce duce la necesitatea schimbării acestora şi implicit la costuri suplimentare;
- membranele sunt fragile şi pot fi deteriorate cu uşurinţă dacă sistemul nu este exploatat corect; dacă este furnizat un curent de aer la presiune mai mare, sau dacă acesta nu are o temperatură corespunzătoare, structura internă poate fi deteriorată fapt care duce la necesitatea înlocuirii membranei;
- pentru un sistem dotat cu compresor de joasă presiune, înlocuirea membranei costă cât circa jumătate din sistem;
- sistemul trebuie monitorizat permanent în timpul funcţionării;
- producerea de amestec NITROX cu ajutorul acestui sistem duce la cele mai mari costuri per butelie de scufundare.

2.4.4. PROCEDEU ŞI INSTALAŢIE DE PREPARARE A AMESTECULUI RESPIRATOR NITROX PRIN OMOGENIZAREA CONTINUĂ A GAZELOR COMPONENTE

Procedeul de preparare a amestecului respirator NITROX prin omogenizarea continuă a gazelor componente presupune utilizatea unor recipienţi pentru stocarea oxigenului şi un dispozitiv special, brevetat (NITROX Stick), care asigură omogenizarea aerului şi a oxigenului pur înainte de a fi admis în compresorul de înaltă presiune.

Schema constructivă şi imaginea unui astfel de dispozitiv de omogenizare este prezentată în figura 2.23.

Pornirea sistemului presupune mai întâi izolarea recipienţilor de stocare a aerului, eliminarea aerului din instalaţie respectând direcţia normală de curgere (prin secţiunea de refulare a compresorului), iar apoi, în timp ce compresorul funcţionează, se cuplează butelia de oxigen şi se furnizează un aport de oxigen astfel încât să se atingă concentraţia dorită în amestec. Procesul de purjare trebuie continuat până când analizorul de oxigen care monitorizează refularea compresorului indică concentraţia de oxigen dorită. Din acest moment, compresorul de aer, filtrele asociate şi conductele pentru transportul aerului se consideră curăţate. Refularea compresorului de înaltă presiune poate alimenta acum fie buteliile folosite la scufundări fie recipienţii de stocare a amestecului NITROX (fig. 2.22). Întreaga operaţie, de la punerea în funcţiune a sistemului până la începerea umplerii buteliilor sau a recipienţilor de stocare, durează circa 5...10 minute.

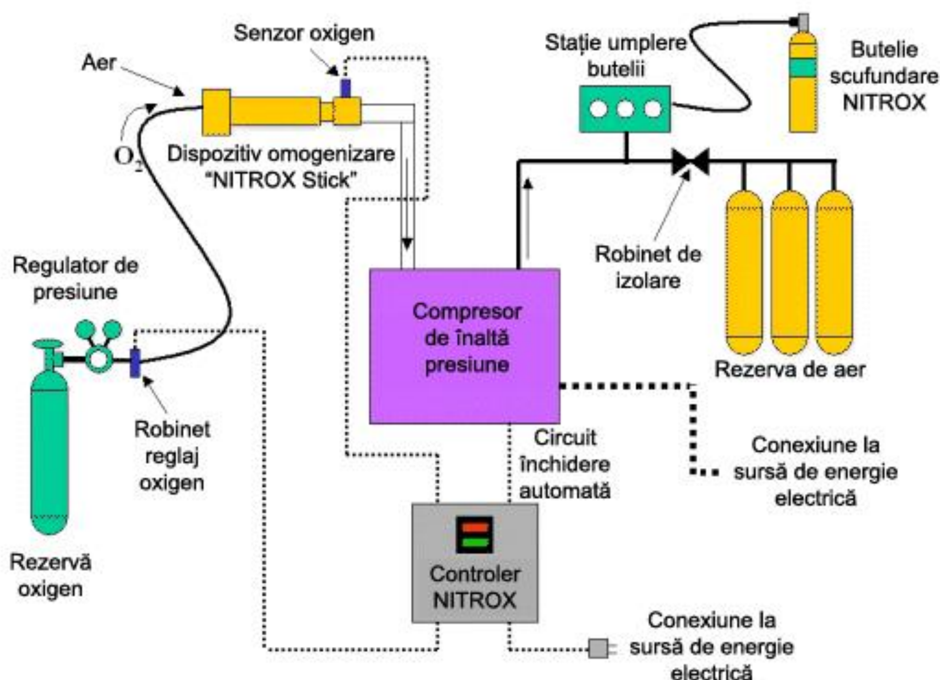


Fig. 2.22. Schema instalaţiei de preparare a amestecurilor NITROX prin procedeul de omogenizare continuă a gazelor.

Avantajele utilizării unui astfel de sistem sunt reprezentate de:

- costul moderat de achiziţie al aparaturii şi posibilitatea fabricării în condiţii de siguranţă a unui amestec de pâna la 40% oxigen;
- nu există restricţii la încărcare privind prezenţa oxigenului în butelii;
- prezenţa controller-ului NITROX (fig. 2.22) oferă operatorului posibilitatea să deruleze şi alte activităţi în timp ce procesul de umplere al buteliilor este în desfăşurare;
- prin aplicarea acestui proocedeu, costurile aferente forţei de muncă scad;
- precizie ridicată în prepararea amestecului NITROX;
- siguranţă sporită în exploatare;

- costurile cele mai reduse, în comparaţie cu alte sisteme, pentru umplerea unei butelii cu amestec NITROX.

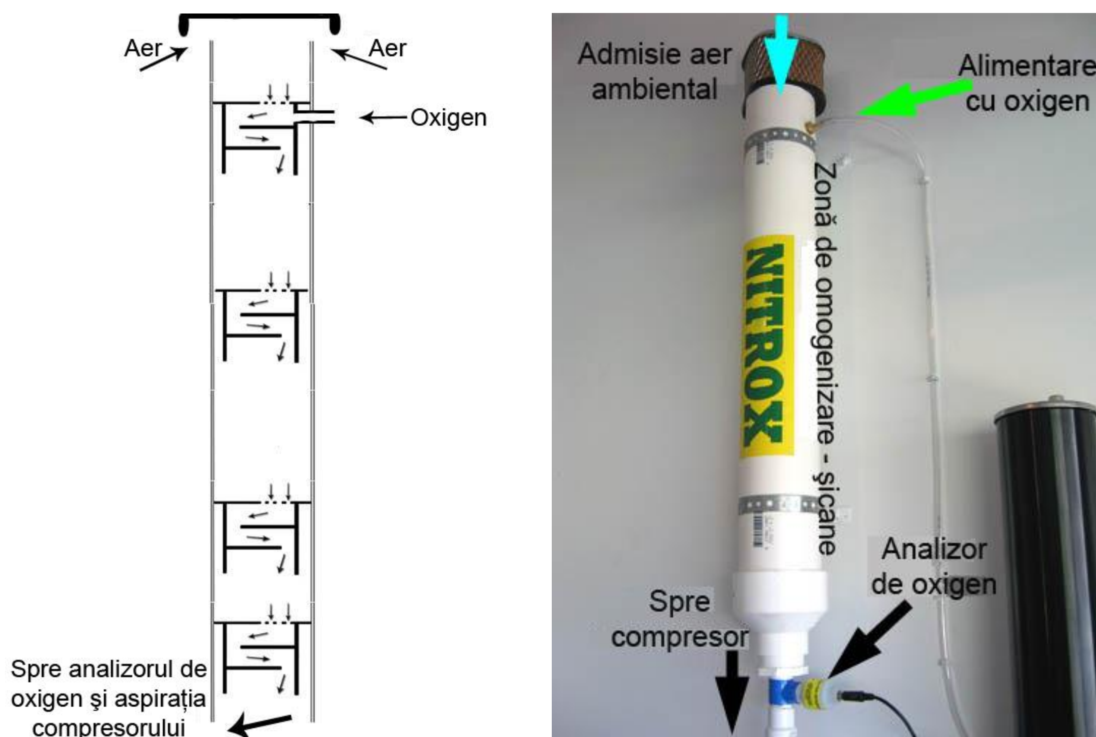


Fig. 2.23. Schema constructivă şi imaginea unui dispozitv „NITROX Stick”.

Dezavantajele sunt reprezentate de necesitatea supravegherii permanente a sistemului dacă acesta nu a fost dotat cu controller NITROX şi de necesitatea existenţei permanente a unei rezerve de oxigen. Trebuie menţionat faptul că exploatarea unui astfel de sistem este justificată în special când acesta este dotat cu controller NITROX.

2.4.5. PROCEDEU ŞI INSTALAŢIE DE PREPARARE A AMESTECULUI RESPIRATOR TRIMIX PRIN OMOGENIZAREA CONTINUĂ A GAZELOR COMPONENTE

Procedeul de preparare a amestecului respirator TRIMIX prin omogenizarea continuă a gazelor componente reprezintă un procedeu realizat printr-o variantă constructivă, mai complexă decât cea a procedeului prezentat anterior şi asigură prepararea amestecurilor TRIMIX (Heliu-Azot-Oxigen) ca cea corespunzătoare dispozitivului prezentat în figura 2.24.

Dispozitivul este conectat la sursa de oxigen şi heliu prin intermediul a două regulatoare de înaltă performanţă care asigură reglarea, cu foarte mare precizie, a cantităţii de gaz. Fiecare regulator comunică cu o unitate de control pe al cărui ecran se poate citi procentajul celor două gaze. De asemenea, unitatea de control asigură întreruperea livrării oxigenului sau heliului dacă:

- comanda de calibrare automată este activă în timp ce compresorul funcţionează;
- se produce o cădere de tensiune;
- senzorul de oxigen înregistrază valoarea de 39.9%;

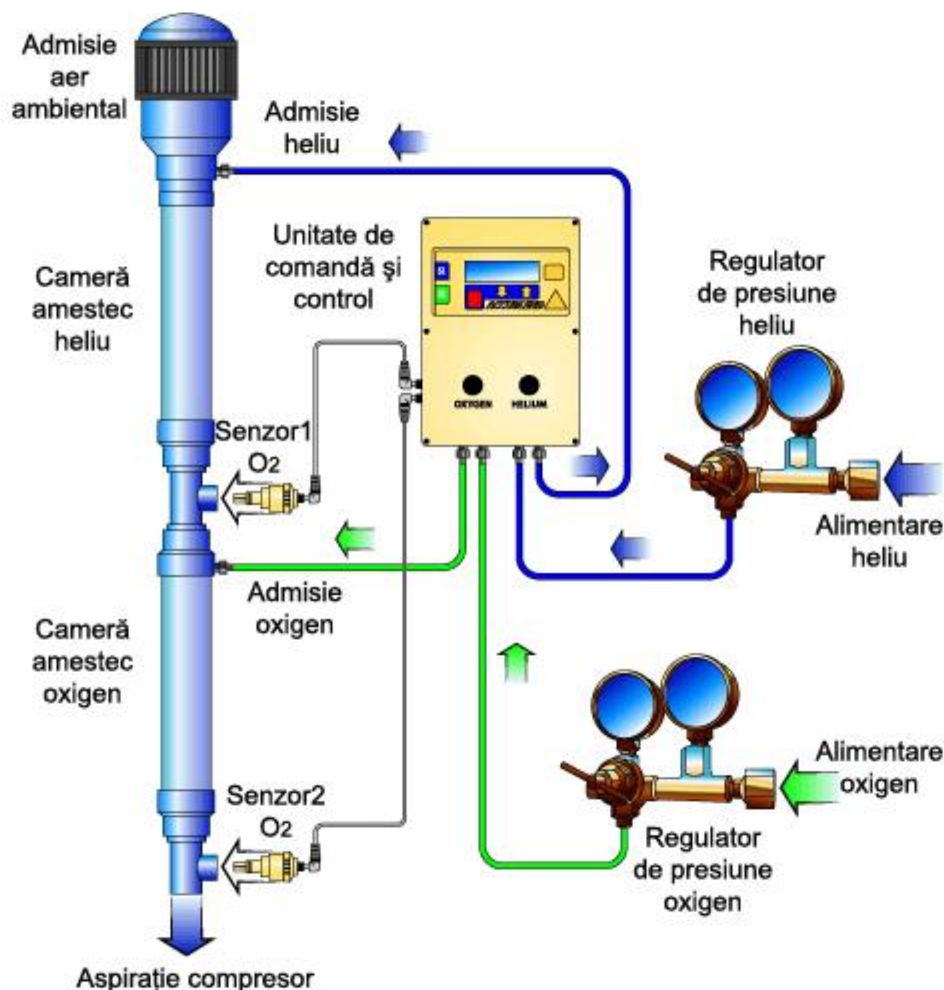


Fig. 2.24. Dispozitiv pentru realizarea amestecului în vederea producerii de amestec respirator TRIMIX prin omogenizarea continuă a gazelor componente.

- cablurile senzorilor sunt decuplate;
- comutatorul de alimentare cu energie electrică este oprit;
- funcţionarea compresorului este întreruptă.

Unitatea de control, prin software-ul său, oferă posibilitatea operatorului de a stabili diverse amestecuri NITROX şi TRIMIX, totodată poate specifica adâncimea echivalentă la care poate apărea narcoza şi de asemenea prin intermediul său pot fi modificate amestecurile NITROX şi TRIMIX existente fără a goli recipienţii.

2.4.6. PROCEDEU ŞI INSTALAŢIE DE PREPARARE A AMESTECULUI RESPIRATOR ÎN FLUX CONTINUU PRIN INJECŢIA GAZELOR COMPONENTE LA DEBIT MASIC CONSTANT

Procedeul de preparare a amestecului respirator în flux continuu prin injecţia gazelor componente la debit masic constant, reprezintă un procedeu original pus la punct prin colaborarea specialiştilor din Departamentul de Hidraulică și Protecția Mediului a Universităţii Tehnice de Construcţii Bucureşti cu specialiştii Centrului de Scafandri Constanţa din cadrul Forţelor Navale Române.

Instalaţia de preparare a amestecurilor respiratorii în flux continuu, este concepută pentru realizarea de amestecuri gazoase binare de tip azot-oxigen (NITROX) sau de tip heliu-oxigen (HELIOX) şi de amestecuri ternare de tip heliu-azot-oxigen (TRIMIX). Deci, funcţie de gazele necesare realizării amestecurilor binare sau ternare dorite, cele două sau trei componente gazoase ce se vor injecta şi amesteca în flux continuu în cadrul instalaţiei pot fi: oxigen cu azot, oxigen cu heliu, oxigen cu azot şi heliu şi eventual oxigen cu aer.

Instalaţia se compune, în principal, din două sau trei linii de injecţie masică ce alimentează cu cele două sau trei componente gazoase, la debite masice prestabilite, amestecate în proporţia dorită prin intermediul unei camere de amestec, un rezervor deformabil (sac deformabil) de tipul unui sac respirator. În figura 2.25 se prezintă schema instalaţiei de preparare a amestecurilor respiratorii binare NITROX, sau HELIOX și ternare TRIMIX, în flux continuu (lucrând cu două sau trei linii de injecţie masică) prin injecţia gazelor componente la debit masic constant.

Fiecare linie de injecţie masică este alcătuită, în principal, dintr-o **butelie** conţinând gazul respectiv la presiune înaltă, prevăzută cu un **robinet de butelie** şi cu un **manometru de înaltă presiune**. Butelia alimentează, prin intermediul unui **reductor de presiune nepilotat**, un **bloc de control şi injecţie masică** alcătuit dintr-un **bloc de control** şi dintr-un **bloc de injecţie masică** propriu-zis. Blocul de control cuprinde un microajutaj de măsură lucrând în regim subsonic, iar blocul de injecţie masică un microajutaj de injecţie masică lucrând în regim critic (sonic).

Microajutajul de măsură este prevăzut cu **două manometre,** unul în amonte și altul în aval de microajutaj**,** care măsoară diferenţa de presiune între presiunile preluate prin prizele de presiune din amonte şi aval de acest ajutaj, prin aceasta punându-se în evidenţă atât curgerea gazului prin ajutaj, deci funcţionarea liniei de injecţie, cât şi menținerea la o valoare constantă a debitului masic al componentei gazoase de pe linia de injecţie respectivă.

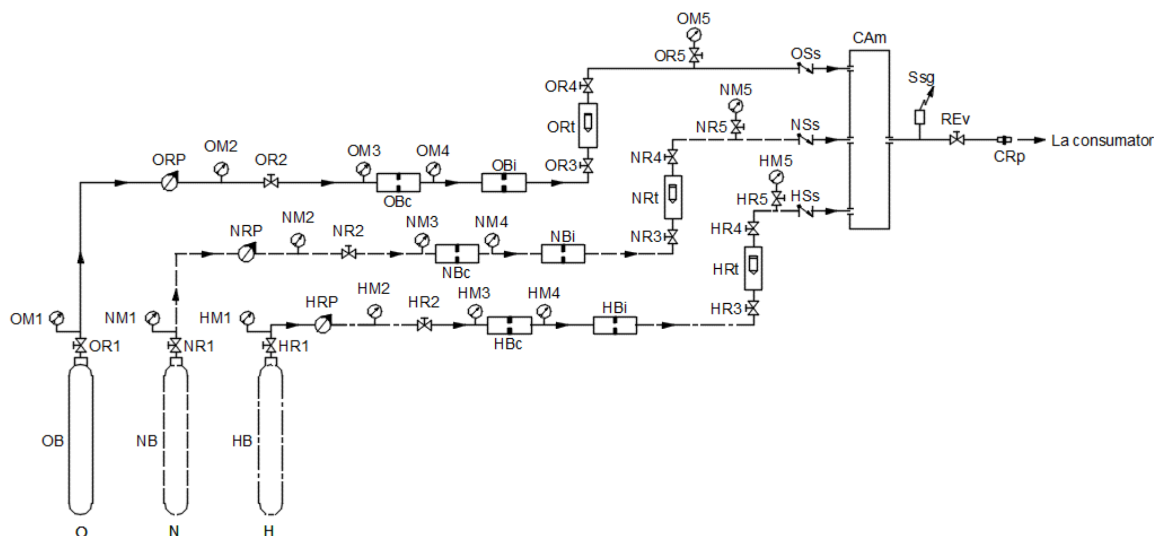
Microajutajul de injecţie masică asigură, pentru un anumit diametru al colului ajutajului şi pentru o anumită presiune de alimentare a ajutajului, realizarea unui debit masic constant, independent de presiunea din aval de ajutaj şi deci independent de presiunea din sacul respirator (din sacul deformabil), al componentei gazoase respective.

Cele două sau trei linii de injecţie masică alimentează **camera de amestec** unde cele două sau trei componente gazoase se amestecă, rezultând amestecul gazos de tip NITROX, HELIOX sau TRIMIX. După camera de amestec, urmează, în sensul curgerii amestecului gazos binar sau ternar, un **robinet sferic** pentru alimentarea cu amestec binar sau ternar a consumatorului.

Caracteristici importante ale instalației cu injecţia gazelor componente la debit masic constant:

- poate prepara și livra amestecuri respiratorii binare sau ternare în flux continuu, cu proporția dorită a componentelor și la diferite debite masice de amestec, independente de presiunea de la consumator;
- poate, prin efectuarea unor simple manevre de modificare a presiunilor de alimentare a ajutajelor de injecţie masică cu debit masic blocat de pe liniile componentelor gazoase, să schimbe atât compoziția cât și debitul masic al amestecului respirator livrat către consumator;

- dimensiunile ajutajelor de injecție masică și presiunile de alimentare a acestora pot fi astfel alese și respectiv reglate încât debitele masice ale componentelor să rămână constante, independent de presiunea de la consumator, ceea ce asigură un debit masic al amestecului constant și cu concentrații dorite.



LEGENDA

O – Linia oxigenului
N – Linia azotului
H – Linia heliului
OB – Butelie oxigen
NB – Butelie azot
HB – Butelie heliu
OR1 ÷ OR5 – Robinete pe linia oxigenului
NR1 ÷ NR5 – Robinete pe linia azotului
HR1 ÷ HR5 – Robinete pe linia heliului
OM1 ÷ OM4 – Manometre pe linia oxigenului
NM1 ÷ NM4 – Manometre pe linia azotului
HM1 ÷ HM4 – Manometre pe linia heliului
ORP – Reductor de presiune nepilotat pe linia oxigenului
NRP – Reductor de presiune nepilotat pe linia azotului
HRP – Reductor de presiune nepilotat pe linia heliului
OBc – Bloc de control pe linia oxigenului
NBc – Bloc de control pe linia azotului
HBc – Bloc de control pe linia heliului
OBi – Bloc de injecție masică pe linia oxigenului
NBi – Bloc de injecție masică pe linia azotului
HBi – Bloc de injecție masică pe linia heliului
ORt – Rotametru pe linia oxigenului
NRt – Rotametru pe linia azotului
HRt – Rotametru pe linia heliului
OSs – Supapă de sens pe linia oxigenului
NSs – Supapă de sens pe linia azotului
HSs – Supapă de sens pe linia heliului
CAm – Camera de amestec
Ssg – Supapă de siguranță
REv – Robinet de evacuare
CRp – Sistem/element cuplare

Fig. 2.25. Schema instalaţiei de preparare a amestecurilor respiratorii binare NITROX sau HELIOX și a amestecurilor ternare TRIMIX, în flux continuu, prin injecţia gazelor componente la debit masic constant.

2.5. OMOGENIZAREA AMESTECURILOR DE GAZE

La fabricarea amestecurilor respiratorii o problemă deosebit de importantă o reprezintă omogenizarea amestecului de gaze, care se produce, pe de o parte, prin fenomenul de difuzie moleculară şi, pe de altă parte, prin fenomenul de difuzie turbulentă specifică turbulenţei jetului creat la injecţia gazului în recipientul cu amestec.

Ţinând cont de teoriile din literatura de specialitate, se poate spune că difuzia unui gaz este cu atât mai mare cu cât viteza şi traiectoria liberă a moleculelor sunt mai mari.

În tabelul 2.2 sunt prezentaţi coeficienţii de difuzie ai câtorva gaze din aer la temperatura de 0^0C.

Tabelul 2.2

Coeficienţii de difuzie ai câtorva gaze din aer la 0^0C

Gaz	Coeficienţii de difuzie [cm^2/s]	Observaţii
CO_2	0,139	Winkelmann
H_2	0,634	Obermayer
O_2	0,178	Obermayer

Din experienţele efectuate de Alfred Taylor rezultă că omogenizarea, în condiţii de repaus, a unui amestec care conţine 25% CO_2 ($r_{CO_2} = 0,25$) şi care a rezultat prin injectarea bioxidului de carbon într-un recipient cu argon, are loc după aproximativ 45 de zile. În prezent, cea mai folosită tehnică de omogenizare a amestecurilor de gaze este agitaţia mecanică (rotirea buteliei). În aceste noi condiţii, la o turaţie de 10 până la 20 rot/min, omogenizarea amestecului argon-dioxid de carbon ($r_{Ar} = 0,75$, $r_{CO_2} = 0,25$), prezentat mai sus, are loc în 1,5 ore. Metoda agitaţiei mecanice este obligatorie când se execută amestecuri în volume mici.

Făcând apel la legile care guvernează amestecarea gazelor sub presiune, trebuie menţionate două probleme importante. Astfel, în timpul compresiei temperatura gazului în recipient creşte şi cu cât viteza compresiei este mai mare cu atât temperatura gazului este mai mare. În acest caz masa de gaz introdusă în recipient este mai mică decât în cazul în care procesul ar fi izotermic. În astfel de situaţii, pentru amestecurile realizate cu urmărirea presiunii din recipient, este interzisă efectuarea unor corecţii ulterioare. Chiar şi în cazul unor procese izotermice pot apărea neconcordanţe datorită faptului că gazele nu sunt perfecte. Totuşi, abaterile sunt neglijabile atunci când amestecarea gazelor are loc la temperatura camerei şi la presiuni relativ mici (vezi procesele de compresie pe timpul scufundărilor în saturaţie când amestecarea gazelor este locală, având loc chiar pe timpul procesului compresiei). Abaterile nu sunt neglijabile atunci când procesul de amestecare are loc la presiuni mari şi în recipienţi cu volume mici.

2.6. ÎNLOCUIREA AMESTECURILOR RESPIRATORII

Când azotul din gazul respirat este înlocuit cu heliu, acesta din urmă este absorbit de plămâni şi simultan azotul este eliminat. Între alveole şi sânge şi între sânge şi ţesuturile organismului are loc o difuzie în contracurent a gazelor. Amestecul respirator HELIOX poate fi respirat timp îndelungat, fără ca organismul să fie afectat. În acest timp, organismul se saturează cu heliu şi ţesuturile sale sunt spălate complet de azot.

Neonul nu este mai uşor decât azotul, dar este mai solubil decât heliul. Argonul este nepotrivit pentru a înlocui azotul din cauza solubilităţii sale mari în soluţii apoase sau grăsimi.

În practică se foloseşte metoda schimbării amestecurilor respiratorii chiar pe timpul decompresiei. Spre exemplu, în cazul decompresiei după o scufundare cu amestec respirator HELIOX, decompresie îngreunată de numeroase accidente osteo-

articulare, se recomandă ca de la 10 m adâncime, spre suprafaţă, să se înlocuiască amestecul HELIOX cu aer. Această înlocuire avantajează desaturarea mai rapidă a ţesuturilor de gazul inert care iniţial a fost heliul. Prin urmare, schimbarea amestecurilor respiratorii favorizează executarea mai rapidă a decompresiei.

Un exemplu edificator în ceea ce priveşte înlocuirea amestecurilor respiratorii pentru scurtarea decompresiei, este reprezentat în figura 2.26. Se observă diferenţe foarte mari, funcţie de amestecurile respiratorii utilizate, micşorându-se decompresia de la aproximativ 316 minute la numai 35 minute. Se consideră o scufundare cu amestec respirator HELIOX la adâncimea de 30 m [4 bar (sc. abs.) = 400 kPa (sc. abs.)] cu durata lucrului în imersiune de 120 minute. Dacă decompresia s-ar executa cu acelaşi amestec respirator HELIOX, durata acesteia va fi de 316 minute. Dacă se schimbă amestecul respirator la primul palier de decompresie cu aer, durata decompresiei se reduce la 170 minute. Dacă în loc de aer se respiră oxigen pur, decompresia se reduce la 83 minute. Cea mai rapidă decompresie se obţine dacă se schimbă amestecul HELIOX cu aer, după 45 minute de la începerea scufundării, iar la decompresie se respiră oxigen încă de la primul palier. În acest caz decompresia va dura numai 35 minute.

Acest sistem de revenire rapidă la presiunea atmosferică se practică numai în cazuri de strictă necesitate, când asupra scafandrului este obligatorie o intervenţie de securitate la presiunea atmosferică.

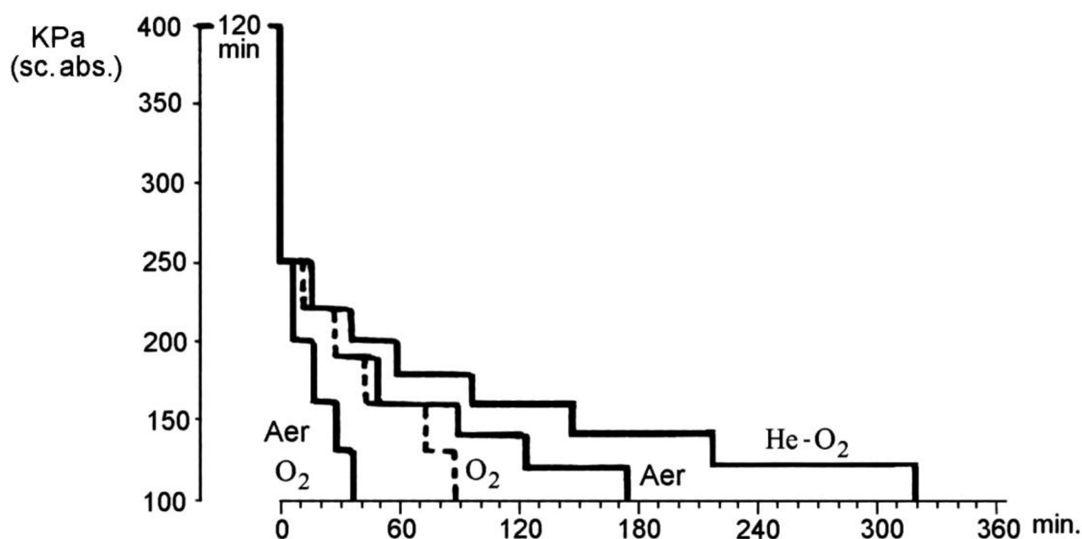


Fig. 2.26. Profilul decompresiei după o scufundare cu amestec HELIOX timp de 120 min., utilizând diferite amestecuri respiratorii (după A. A. Bühlmann).

3.

APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS ŞI ÎNCHIS

3.1. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS. GENERALITĂŢI

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis sunt aparatele la care întregul amestec gazos, rezultat din expiraţie, este evacuat în mediul acvatic exterior. Aceste aparate sunt alcătuite din buteliile de stocaj pentru rezerva de gaz sau de amestec gazos respirator înmagazinate sub presiune, atunci când aparatele sunt autonome, şi dintr-un regulator de presiune care asigură respiraţia la o presiune egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie. Autonomia acestor aparate este relativ redusă. Atunci când se doreşte ca timpul de imersie să fie mai mare, se utilizează aparate de respirat sub apă cu circuit deschis alimentate cu aer sau cu amestec gazos sintetic de la suprafaţă sau dintr-un mijloc imersat. Adâncimea de scufundare cu aparatele în circuit deschis este relativ mare, până la 50…75 m.

3.2. TIPURI DE APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis sunt de două feluri:

- aparate cu circuit deschis, *cu debit continuu*;
- aparate cu circuit deschis, *cu debit la cerere*.

În figura 3.1 se prezintă schematic caracteristicile şi performanţele aparatelor de respirat sub apă cu circuit deschis.

3.2.1. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS,CU DEBIT LA CERERE, AUTONOME

Aparatul autonom pentru respirat sub apă este acel aparat constituit, în principal, dintr-un recipient cu gaze respiratorii şi prevăzut cu o instalaţie de distribuţie şi control, care asigură întreaga cantitate de amestec respirator necesară scafandrului pentru executarea unei scufundări. Optim pentru un aparat de scufundare înseamnă: timp mare în imersiune, adâncime cât mai mare şi timp de decompresie cât mai scurt.

Aparatele cu circuit deschis cu debit la cerere se caracterizează prin aceea că amestecul respirator este livrat numai în faza de inspiraţie, livrarea având o durată egală cu durata inspiraţiei. În fazele de apnee şi de expiraţie livrarea de amestec este întreruptă.

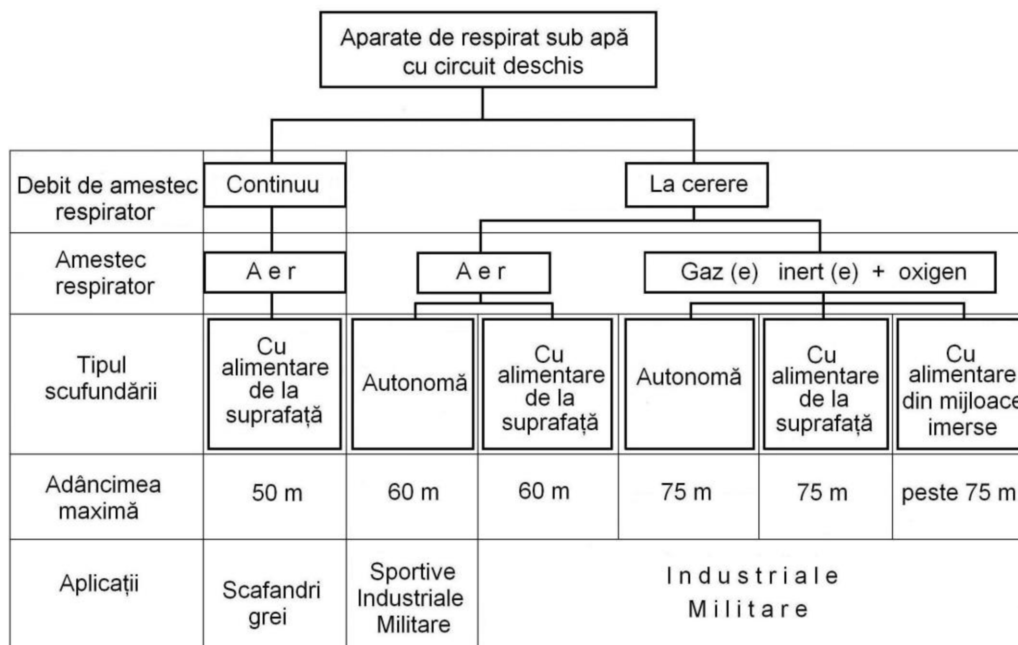


Fig. 3.1. Schema generală cu caracteristicile, performanţele şi domeniile de aplicare pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis.

Elementul comun al *aparatelor cu circuit deschis, cu debit la cerere, autonome* îl reprezintă aparatul de respirat propriu-zis. Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit de gaz respirator livrat la cerere, autonome, au în componenţă şi rezerva de gaz necesară respiraţiei pe timpul lucrului în imersiune, rezervă ce este transportată de către scafandru.

3.2.1.1. Aparatul cu circuit deschis, autonom, cu detentor COMEX SUPER-PHYSALIE

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, autonome, echipate cu detentor SUPER-PHYSALIE, sunt utilizate pe scară largă de către scafandrii profesionişti, atât militari cât şi civili. Acest detentor, cu reducerea presiunii în două trepte, este fabricat de firma franceză COMEX şi reprezintă un detentor profesional. În figura 3.2 se prezintă schema detentorului treapta I SUPER-PHYSALIE cu elementele componente principale, iar în figura 3.3 se prezintă schematic detentorul treapta a II-a.

Urmărind schema simplificată din figura 6.28 se observă că detentorul treapta I este cu membrană necompensată, aşa numitul model standard. De o parte a membranei acţionează forţa dată de presiunea gazului din camera de medie presiune, iar de cealaltă parte, forţa elastică a resortului de taraj împreună cu cea generată de presiunea hidrostatică a mediului exterior. La inspir, echilibrul se rupe, membrana se înalţă şi deschide clapetul de admisie. Gazul pătrunde până când presiunea medie atinge o valoare cu 8...12 bar peste presiunea mediului exterior şi echilibrul se restabileşte.

Detentorul treapta a II-a, conform schemei din figura 6.29 are interiorul împărţit în două camere de către o membrană de cauciuc, aflată în echipresiune. De o parte a ei acţionează forţa dată de presiunea hidrostatică (fiind în contact direct cu apa), iar de cealaltă parte, forţa dată de presiunea gazului inspirat.

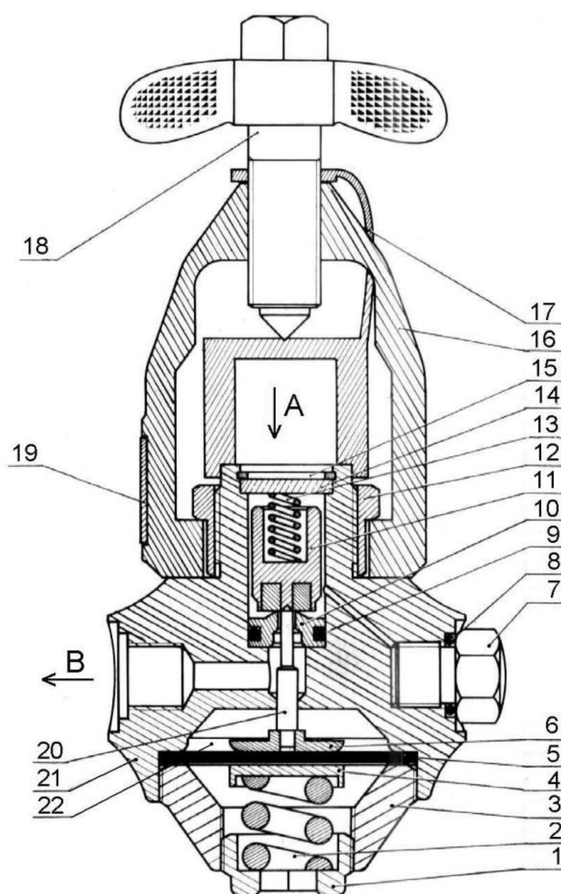


Fig. 3.2. Schema detentorului treapta I SUPER-PHYSALIE:
A. Alimentare cu amestec respirator la înaltă presiune;
B. Ieşire amestec respirator la medie presiune;
1– şurub de reglaj; 2– resort de taraj;
3– capac; 4– taler resort;
5– membrană; 6– taler tijă;
7– dop; 8,9– inele de etanşare;
10– scaun clapet; 11– clapet;
12– piuliţă de fixare;
13– resort clapet; 14– filtru sinterizat;
15– inel de siguranţă;
16– jug de fixare pe butelie;
17– dop de protecţie;
18– şurub de fixare;
19– placă de inscripţionare; 20– tijă;
21– corp detentor;
22– cameră medie presiune.

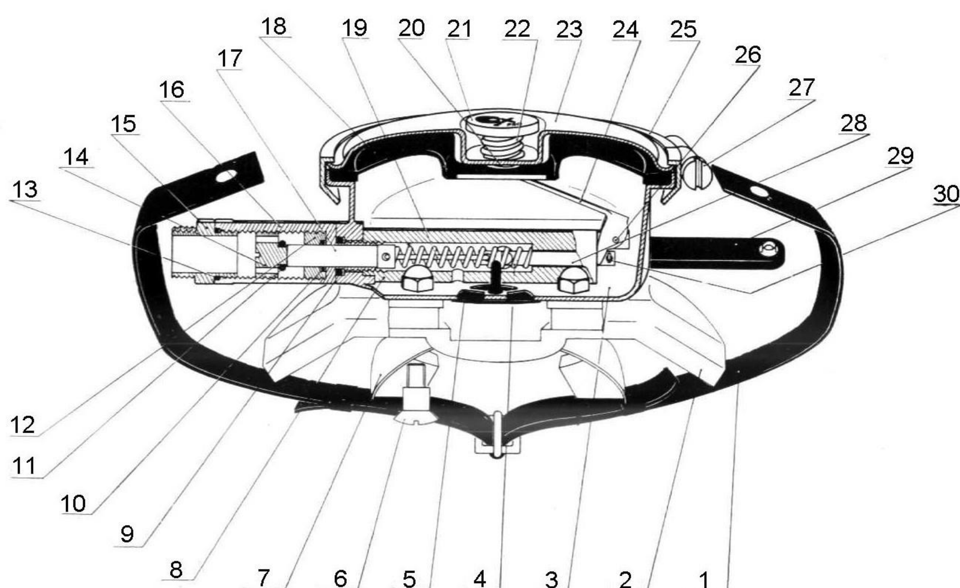


Fig. 3.3. Schema detentorului treapta a II-a SUPER-PHYSALIE:
1- baretă; 2- deflector; 3- cutie; 4- resort de rapel; 5- supapă expiraţie; 6- şurub; 7- piesă bucală; 8- corp joasă presiune; 9,10,11- garnituri oring; 12- suport oring; 13- oring; 14- scaun clapet; 15- manşon; 16- port clapet; 17- piston clapet; 18- membrană; 19- tijă ac; 20- rondea; 21- buton debit continuu; 22- resort buton; 23- capac; 24- pârghie; 25- inel de închidere; 26- ax levier; 27- şurub; 28- tijă piston clapet; 29- bridă piesă bucală; 30- opritor.

Noutatea adusă de acest model este că scaunul supapei de admisie este mobil şi nu clapetul, ca la modelele anterioare. Scaunul, care are forma unui cilindru, este mişcat axial prin intermediul pârghiei de către membrană. Scaunul urmăreşte mişcările alternative ale membranei, deschizând şi închizând supapa după mişcările respiratorii ale scafandrului. Detentorul este prevăzut şi cu buton de debit continuu. Aparatul livrează gazul respirator la cerere sau continuu dacă se apasă butonul respectiv.

Detentorul SUPER-PHYSALIE asigură scafandrului un debit de 300 l_N/min, la o depresiune de 3…4 cm H_2O (3…4 mbar) creată prin inspiraţie. Gazul respirator din butelii este comprimat la o presiune de maximum 200 bar (sc. man.).

3.2.1.2. Aparatul cu circuit deschis, autonom, cu detentor SHARK

Detentorul SHARK (fig. 3.4), fabricat de firma germană DRÄGER, este un regulator de înaltă performanţă cu două trepte legate între ele printr-un furtun de medie presiune. Detentorul treapta I este de tipul cu piston compensat care asigură o independenţă a presiunii medii la ieşirea din prima treaptă în raport cu scăderea presiunii din buteliile de stocaj. Detentorul treapta a II-a este conceput ţinând cont de *principiul amonte*, asigurând o creştere a debitului la acelaşi efort de inspiraţie.

Detentorul SHARK ete prevăzut,la treapta I, cu două racorduri de înaltă presiune şi cu patru racorduri de medie presiune. De asemenea, este prevăzut cu un conector de înaltă presiune pentru racordarea la butelii atât tip DIN cât şi tip INT. Detentorul treapta a doua este prevăzut şi cu un deflector de bule de concepţie specială.

Detentorul SHARK treapta I poate fi racordat, prin intermediul unui furtun de medie presiune prevăzut cu un cuplaj rapid, la o mască facială ORCA, fabricată de firma DRÄGER, cu detentor treapta a II-a integrat (fig. 3.5).

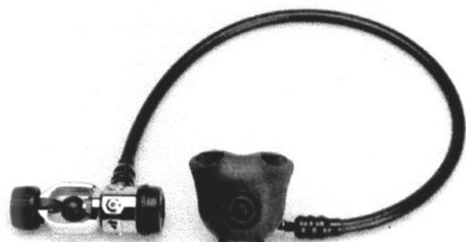


Fig. 3.4. Detentorul cu două trepte SHARK.

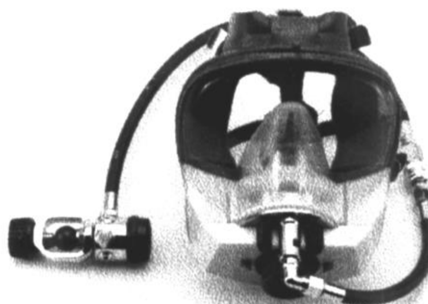


Fig. 3.5. Detentor treapta I SHARK racordat la detentor treapta a II-a integrat la masca facială ORCA.

3.2.1.3. Aparatul cu circuit deschis, autonom, MODULAR 600

Aparatul MODULAR 600 (fig. 3.6) fabricat de firma DRÄGER este un aparat de scufundare ce poate fi utilizat atât ca aparat autonom cât şi ca aparat de rezervă în cazul scafandrilor alimentaţi cu aer de la suprafaţă. Aparatul MODULAR 600 este compus din aparatul de bază BASIC 600 şi din masca facială SECORA 600.

Aparatul de bază BASIC 600 constă din două butelii (2×4 *l* la 300 bar (sc. man.), corespunzător unei rezerve de aer de 2800 l_N, sau 2×6 *l* la 300 bar (sc. man.), corespunzător unei rezerve de aer de 3500 l_N), un detentor treapta I robust şi protejat contra îngheţului şi murdăriei şi un detentor treapta a II-a direct integrat la mască protejat de asemenea contra formării de gheaţă şi murdăriei.

Detentorul treapta I este prevăzut cu patru racorduri de presiune medie oferind suficiente posibilităţi de conectare la detentor treapta a II-a, la ventilul de siguranţă, la sistemul de umplere a costumului cu volum contant etc. Detentorul treapta a II-a este caracterizat printr-o rezistenţă la respiraţie foarte scăzută, conferind aparatului un confort ridicat. Aparatul este prevăzut cu un echipament electronic de avertizare, scafandrul primind un semnal optic în mască atunci când presiunea din butelii scade sub 50 bar (sc. man.). Totuşi, aparatul este dotat şi cu un manometru de control, independent de sistemul electronic de avertizare. Masca facială SECORA 600 este o mască cu un vizor astfel construit încât, prin sistemul antirefracţie, asigură perceperea de către scafandru a unei imagini nedeformate, la scară reală. De asemenea, masca dispune de un dispozitiv special integrat care conduce la îndepărtarea bulelor de aer expirat şi permite o egalizare rapidă a presiunii.

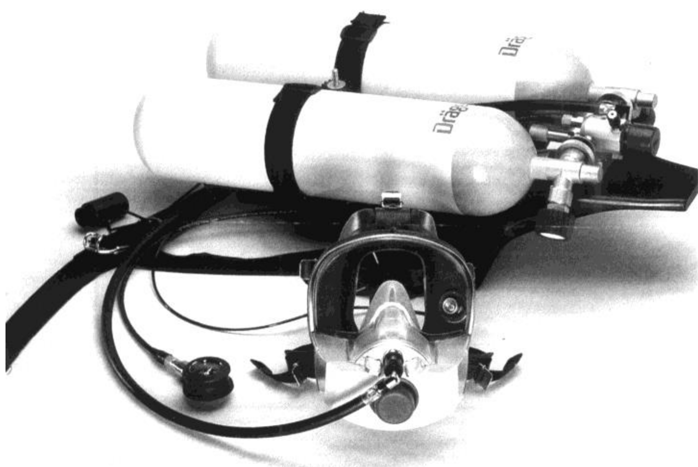


Fig. 3.6. Aparatul de respirat sub apă autonom cu circuit deschis şi debit la cerere MODULAR 600.

3.2.1.4. Aparatul cu circuit deschis, autonom, PA 38

Aparatul autonom de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit de aer livrat în sistemul la cerere PA 38, este un aparat realizat de firma DRÄGER şi utilizat pentru intervenţii subacvatice de scurtă durată. Caracteristicile aparatului PA 38 sunt următoarele (fig. 3.7):

- utilizează butelii de 4 *l*, 6 *l* sau 7 *l*;
- stocajul de gaz poate fi de 1600 l_N, 2800 l_N sau 3600 l_N;
- este echipat cu un detentor treapta a II-a pentru conectarea la masca facială simplă sau la masca cagulei costumului cu volum constant;
- este prevăzut cu un manometru de control a presiunii din butelii;
- este echipat cu un detentor treapta I care reduce presiunea de la valoarea presiunii înalte din butelii, ce poate avea valoarea maximă de 200 bar (sc. man.) sau 300 bar (sc. man.), la o valoare de 5 bar (sc. man.), independentă de adâncimea de imersie.

Aparatul PA 38 este fabricat în trei variante şi anume PA 38/1600, PA 38/2800 şi PA 38/3600.

Modelul PA 38/1600 este utilizat pentru scufundări cu durată scurtă având un stocaj de gaz de 1600 l_N (butelii 2×4 *l* umplute cu aer la 200 bar (sc. man.)). Aparatul prevăzut cu un sistem de rezervă corespunzătoare unei presiuni a gazului din butelii de 40 bar (sc. man.), echivalent cu un volum de rezervă de gaz de 320 l_N. Acest model este utilizat pentru scufundări la adâncimi de până la 10 m.

Modelul PA 38/2800 are un stocaj de 2800 l_N (butelii 2×7 *l* umplute cu aer la 200 bar (sc. man.)). Aparatul este prevăzut cu un sistem de rezervă corespunzătoare unei presiuni a aerului din butelii de 40 bar (sc. man.), echivalent cu un volum de rezervă de gaz de 560 l_N. Acest aparat este utilizat la adâncimi de până la 20 m.

Modelul PA 38/3600 are un stocaj de 3600 l_N (butelii 2×6 *l* umplute cu aer la 300 bar (sc. man.)). Aparatul este prevăzut cu un sistem de rezervă corespunzătoare unei presiuni a aerului din butelii de 60 bar (sc. man.), echivalent cu un volum de rezervă de gaz de 720 l_N. Acest model este utilizat la adâncimi de până la 20 m.

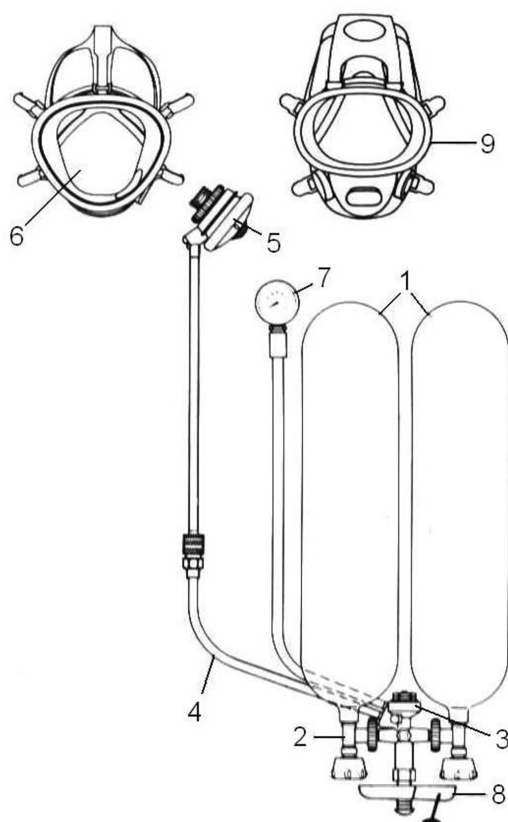


Fig. 3.7. Schema aparatului de respirat sub apă autonom şi cu circuit deschis PA 38:
1- butelii aer comprimat;
2- robinet butelie;
3- detentor treapta I;
4- furtun de medie presiune;
5- detentor treapta a II-a;
6- mască facială simplă;
7- manometru de control;
8- levierul de acţionare a rezervei;
9- masca cagulei costumului cu volum constant.

3.2.2. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS, CU DEBIT LA CERERE, CU ALIMENTARE DE LA SUPRAFAŢĂ

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere, în varianta cu alimentare de la suprafaţă prin ombilical oferă scafandrului posibilitatea staţionării un timp îndelungat la adâncimea de lucru deoarece sursa de amestec gazos respirator folosită poate fi ori o baterie de butelii cu capacitate mare de stocare, ori un compresor. Pentru acest tip de aparate cu alimentare de la suprafaţă prin ombilical, se folosesc, de obicei, staţii de stocare a amestecului respirator formate din mai multe butelii de 50 *l* încărcate cu amestec respirator la o presiune de 200 bar (sc. man.). Buteliile sunt grupate sub formă de rack alcătuit, în general, din nouă butelii având o

capacitate maximă de stocare de 90 m_N^3. În condiţiile unei nave suport specializate sau în condiţii de laborator hiperbar, se mai pot utiliza şi recipienţi sferici de 600 *l* la 200 bar (sc. man.) asigurând o capacitate de 120 m_N^3.

Scufundarea de sistem cu astfel de aparate de respirat sub apă este pusă în aplicare pentru lucrări la adâncimi mari sau pentru lucrări de lungă durată. Are avantajul unei alimentări permanente cu amestec respirator, unei protecţii termice foarte bune şi unui sistem de comunicaţie permanentă cu suprafaţa.

Dezavantajul metodei constă într-o desfăşurare înceată, într-o mobilitate redusă a scafandrului şi în necesitatea unui suport logistic de suprafaţă foarte important.

3.2.2.1. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă, PL 70

Aparatul PL 70 este un aparat cu circuit deschis, alimentat de la suprafaţă, cu debit livrat la cerere, fabricat de firma DRÄGER. Acest aparat are o greutate mică şi poate fi folosit până la adâncimea maximă de scufundare cu aer (50 m).

Conform schemei aparatului din figura 3.8, aparatul PL 70 este caracterizat printr-o alimentare cu aer prin furtun, fiind echipat totodată şi cu o baterie de butelii cu aer de securitate cu un volum de 800 l_N. La alegere, aparatul poate fi dotat cu un robinet de comutare de la alimentarea de la suprafaţă la alimentarea din rezerva de securitate, fie acţionat manual (PL 70 H), fie acţionat automat (PL 70A).

Aparatul PL 70 este echipat şi cu un detentor treapta a II-a identic cu cel al aparatului PA 38. Detentorul este o valvă de dozaj controlată de respiraţie care se deschide la inspiraţie şi se închide la expiraţie. Acesta asigură livrarea, la cerere, a unui volum de aer necesar scafandrului în faza de inspiraţie. Totodată, detentorul compensează presiunea exterioară a apei. Aerul expirat este eliminat în mediul acvatic exterior printr-o supapă de evacuare. Aparatul este conectat, prin detentor, la masca facială simplă sau la masca facială a cagulei unui costum cu volum constant.

În figura 3.9 sunt prezentaţi doi scafandri echipaţi cu costume cu volum constant şi alimentaţi cu aer prin intermediul aparatelor de respirat PL 70.

Atât la aparatul PL 68 cât şi la aparatul PL 70 alimentarea cu aer este posibilă în două feluri (fig. 3.10):

- prin utilizarea unor baterii de butelii de stocare transportabile la locul scufundării, încărcate la o presiune de 150…200 bar (sc. man.) şi deservite de un reductor de presiune care reduce presiunea de dinainte de detentor la valoarea de după acesta de 8…10 bar (sc. man.);
- cu un compresor de medie presiune, care livrează aer comprimat la o presiune de circa 40 bar (sc. man.) şi la un debit de circa 400 l_N/min, la care se cuplează un reductor de presiune la ieşire, pentru a reduce presiunea aerului comprimat de la 40 bar (sc. man.) la 10 bar (sc. man.), presiune necesară aerului comprimat pe sistem înainte de detentorul treapta a II-a cuplat la masca facială.

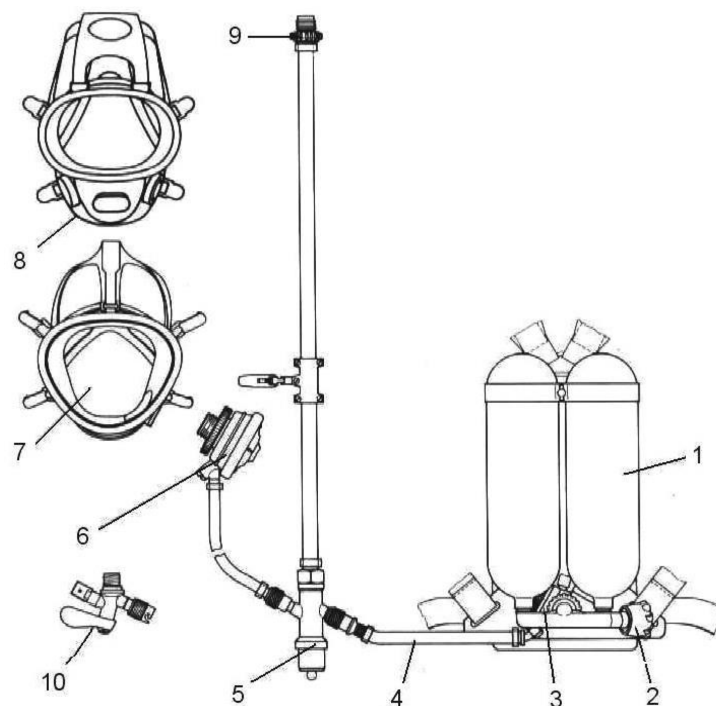


Fig. 3.8. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă, PL 70:
1- bloc butelii securitate; 2- robinet butelie; 3- detentor treapta I; 4- furtun de medie presiune; 5- robinet de comutare automată; 6- detentor treapta a II-a; 7- mască facială; 8- mască facială pentru cagula costumului cu volum constant; 9- conector furtun alimentare de la suprafaţă; 10- robinet de comutare manuală.



Fig. 3.9. Scafandri echipaţi cu aparate de respirat sub apă cu alimentare de la suprafaţă PL 70.

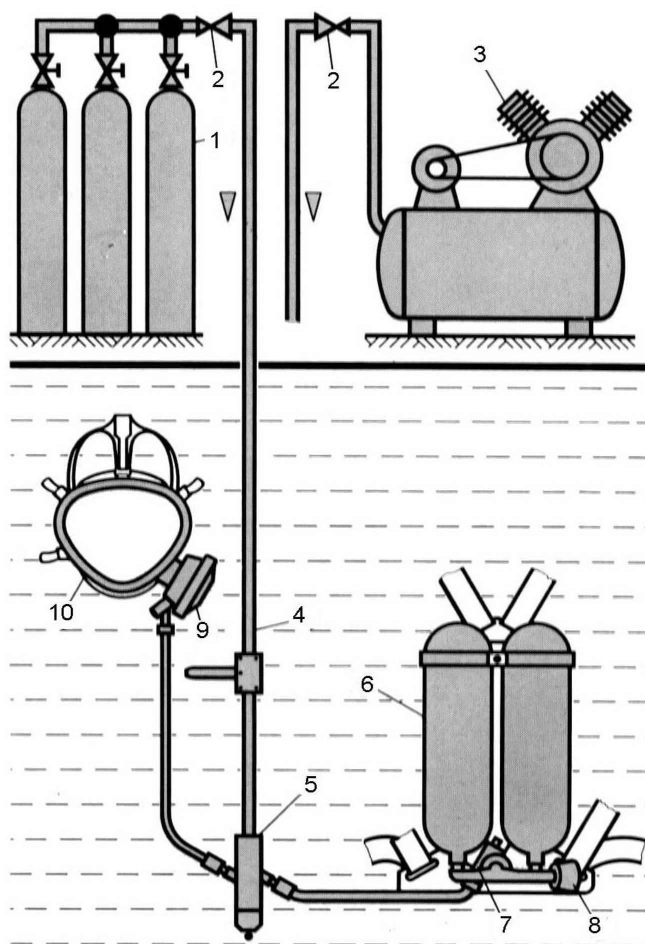


Fig. 3.10. Modalităţi de alimentare cu aer de la suprafaţă a aparatelor PL 70:
1- baterii de butelii de stocare;
2- reductor de presiune treapta I;
3- compresor;
4- furtun de alimentare;
5- robinet de comutare;
6- bloc butelii securitate;
7- detentor treapta I butelii;
8- robinet butelie;
9- detentor treapta a II-a;
10- mască facială.

3.2.2.2. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă MK21 MOD 1

În figura 3.11 este prezentată schema echipamentului MK21 MOD1 şi casca rigidă aferentă, folosit de U.S. Navy pentru operaţiuni de scufundare la adâncimi de până la 100 m cu amestec HELIOX şi până la maximum 60 m cu aer.

Echipamentul este compus din: cască asamblată, ansamblu ombilical şi sistem de alimentare de urgenţă.

Casca este rigidă şi este echipată cu un detentor treapta a II-a de tip Kirby-Morgan alimentat de la suprafaţă printr-un furtun de medie presiune. Presiunea de alimentare este cu 9…11 bar peste presiunea mediului. Furtunul este prevăzut cu o supapă de sens unic, care nu permite gazului să iasă din cască în cazul în care, în mod accidental, furtunul se depresurizează. Această supapă este amplasată lateral pe cască. Casca este înzestrată cu un dispozitiv de dezaburire. De asemenea, aceasta este prevăzută cu sistemul receptor-microfon pentru comunicaţia audio.

Ansamblul ombilical este alcătuit din furtunul de alimentare de la suprafaţă, cablul de comunicaţie audio şi cablul de rezistenţă. Sistemul de alimentare pentru cazuri de urgenţă este compus dintr-o butelie cu detentor treapta I. Butelia are o capacitate de 2 *l* şi presiunea maximă de încărcare de 150 bar (sc. man.). Scafandrul deschide butelia de rezervă în cazul în care alimentarea de la suprafaţă este defectuoasă.

Echipamentul permite respiraţia în circuit deschis, cu un debit maxim de 300 l_N/min. Aparatul oferă un grad ridicat de siguranţă în scufundare şi de fiabilitate, dar libertatea de mişcare a scafandrului este mult limitată faţă de cea a unui scafandru autonom.

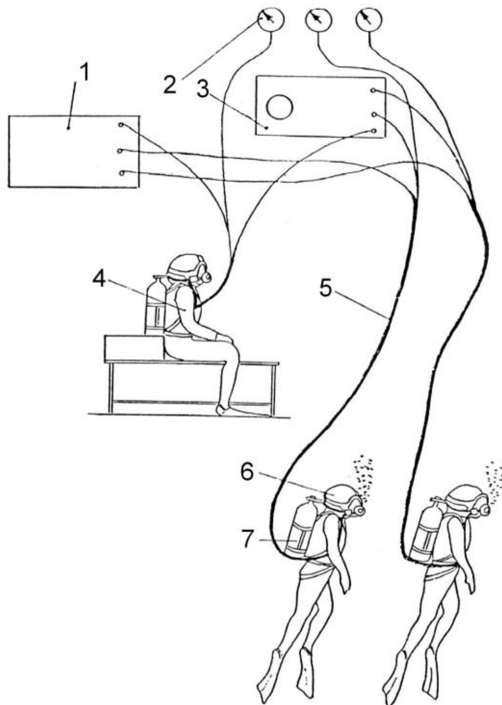




Fig. 3.11. Schema instalaţiei de scufundare cu circuit deschis şi alimentare de la suprafaţă MK 21 MOD 1 şi casca rigidă aferentă: 1- instalaţie de alimentare cu gaz respirator; 2- pneumofazometre; 3- tablou comunicaţii; 4- scafandru însoţitor; 5- ombilical; 6- cască rigidă cu detentor treapta a II-a; 7- butelie cu rezervă de gaz pentru securitate.

3.2.2.3. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă, ISAS

Instalaţia de scufundare cu alimentare de la suprafaţă, ISAS, este un aparat de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit livrat în sistemul la cerere.

Circuitul respirator al instalaţiei de scufundare cu alimentare de la suprafaţă ca şi instalaţia în ansamblul ei, au fost concepute de un colectiv de specialişti aparţinând Centrului de Scafandri Constanţa. Instalaţia este concepută să asigure desfăşurarea scufundărilor cu aer, cu durată mare de imersiune, în şantiere situate la adâncimi de până la 18 m. Instalaţia, prezentată schematic în figura 3.12, cuprinde un rezervor de aer de mare capacitate, o mască facială, ombilicalul şi butelia de rezervă.

a. *Rezervorul de aer*, aflat la suprafaţă, este o butelie de mare capacitate (40 *l* la 200 bar (sc. man.)), sau un bloc de butelii (4×12 *l* la 200 bar (sc. man.)). La sursa de aer este montat un detentor treapta I, echipat cu un manometru de înaltă presiune şi unul de joasă presiune, cu ajutorul cărora se urmăreşte evoluţia presiunii gazului din rezervor şi, respectiv, din furtunul de alimentare.

b. *Ombilicalul* (legătura între scafandru şi instalaţiile de suprafaţă) este compus din furtunul de alimentare cu aer, saula de rezistenţă şi cablul de comunicaţii audio. Furtunul de alimentare este confecţionat din cauciuc siliconic armat şi rezistă la

presiunea de 19 bar (presiunea de lucru). El face legătura între cele două trepte ale aparatului de respirat. Saula de rezistenţă preia solicitările ce apar la ombilical.

c. *Masca facială* este executată din cauciuc şi are o formă adecvată feţei unui scafandru de talie mijlocie. Pe mască este montat detentorul treapta a II-a, prin care respiraţia se face la cerere, sau continuu, în funcţie de opţiunea utilizatorului. Detentorul, tip SUPER-PHYSALIE, nu este prevăzut cu muştiuc, pentru ca scafandrul să poată vorbi. Aerul este inspirat din mască, microfonul este amplasat în partea de jos a măştii, lateral. Spaţiul din mască, prevăzut pentru posibilitatea comunicării, reprezintă un volum mort pentru respiraţie. El se adaugă volumului mort din camera de joasă presiune a detentorului treapta a II-a. Din această cauză, respiraţia prin mască cere scafandrului un efort suplimentar faţă de respiraţia prin piesa bucală din aparatele de respirat cu circuit deschis, autonome.

d. *Butelia de rezervă* este purtată de scafandru pe spate. Ea are capacitate mică: 2 *l* la 150 bar (sc. man.). La butelie este ataşat un detentor treapta I, a cărui funcţionare este pilotată de presiunea hidrostatică. Această butelie este deschisă de scafandru în cazul în care, în mod accidental, s-a întrerupt alimentarea de la suprafaţă.

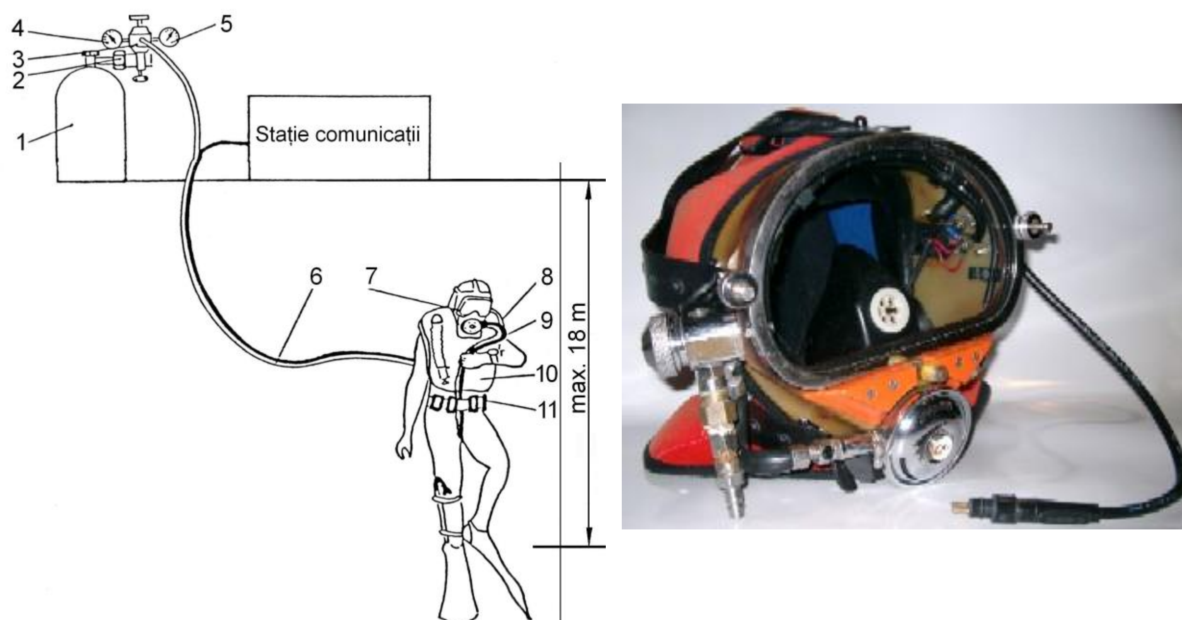


Fig. 3.12. Elementele componente ale instalaţiei de scufundare cu circuit deschis şi alimentare de la suprafaţă, ISAS şi masca facială aferentă: 1- butelii de mare capacitate cu aer; 2- racord; 3- detentor treapta I; 4- manometru de înaltă presiune (0…200 bar); 5- manometru de medie presiune (0…25 bar); 6- ombilical; 7- mască facială cu detentor treapta a II-a; 8- cablu comunicaţii; 9- furtun de alimentare cu aer la presiune medie; 10- vestă de salvare; 11- centură lest.

Furtunul de alimentare cu gaz respirator de la suprafaţă este prevăzut cu o supapă de sens unic care, atunci când se trece pe rezervă, închide calea de pierdere a aerului pe furtunul avariat. Supapa funcţionează şi automat dacă butelia de rezervă este deschisă încă de la începutul scufundării, iar presiunea medie de alimentare de la suprafaţă, de 12 bar (sc. man.) este superioară celei de la butelia de rezervă, de 8 bar (sc. man.). Autonomia oferită de această instalaţie este de două ori mai mare decât a unui aparat autonom cu butelii de 2×12 *l*. Zona de intervenţie a scafandrului este restrânsă de lungimea ombilicalului.

3.3. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT ÎNCHIS. GENERALITĂŢI

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis sunt aparatele, la care întregul amestec gazos rezultat prin expiraţie este recirculat, o parte din amestec (dioxidul de carbon) fiind reţinută în cartuşul epurator (absorberul de CO_2) aferent aparatului, cealaltă parte fiind reciclată. Aceste aparate sunt autonome şi sunt alcătuite din butelia de stocaj cu oxigen sau cu amestec gazos respirator, dintr-un reductor de presiune treapta I, care reduce presiunea oxigenului sau amestecului respirator de la presiunea înaltă din butelie la o presiune medie şi dintr-un sac respirator funcţionând ca un reductor treapta a II-a ce permite reducerea presiunii de la valoarea medie la o valoare corespunzătoare adâncimii de imersie.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis au fost concepute pentru creşterea autonomiei de scufundare şi a randamentului scufundării prin reducerea timpilor de decompresie.

3.4. TIPURI DE APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT ÎNCHIS

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis pot livra oxigenul sau amestecul respirator fie continuu, fie la cerere. Atunci când aceste aparate utilizează amestec respirator, acesta poate fi realizat prin amestecare locală sau poate fi prefabricat. Autonomia acestor aparate este foarte ridicată. Adâncimea maximă teoretică de lucru la aparatele cu circuit închis este de 6,5 m pentru aparatele cu oxigen (pentru scufundări cu oxigen cu durată relativ scurtă, adâncimea de scufundare poate creşte până la 10 m şi chiar mai mult pentru incursiuni cu durată foarte mică) şi mai mare pentru aparatele cu amestec.

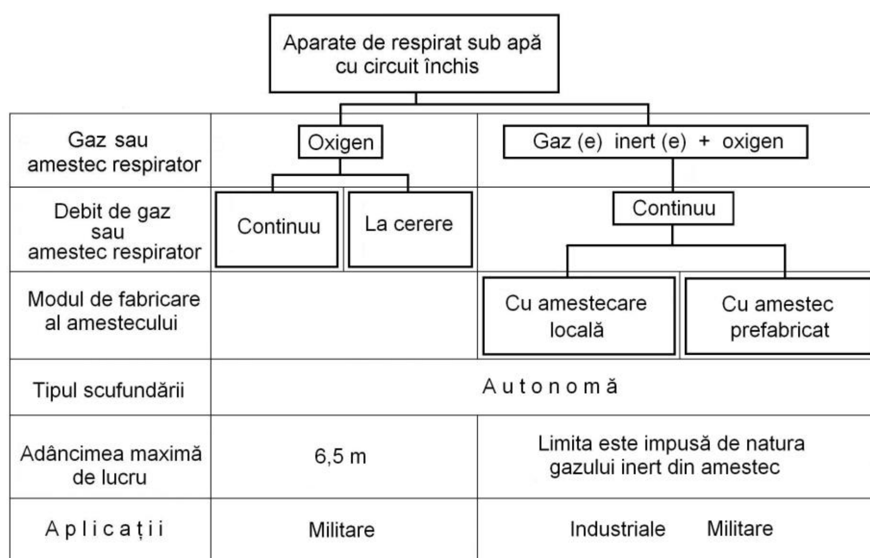


Fig. 3.13. Schema generală cu caracteristicile, performanţele şi domeniile de aplicaţie pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit închis.

Prin urmare, aparatele de respirat sub apă cu circuit închis pot fi de două feluri:
- aparate cu circuit închis, *cu oxigen*;
- aparate cu circuit închis, *cu amestec*.

În figura 3.13 se prezintă o schemă generală cu caracteristicile şi performanţele aparatelor de respirat sub apă cu circuit închis.

3.4.1. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT ÎNCHIS, CU OXIGEN

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, sunt utilizate, prin excelenţă, în scopuri militare. Utilizarea oxigenului şi implicit a acestor aparate a apărut ca o necesitate pentru efectuarea de intervenţii subacvatice silenţioase la obiective de interes militar, fără ca scafandrii să fie detectaţi de la suprafaţă (prin lipsa bulelor de gaz expirat) şi fără ca scufundarea să necesite paliere de decompresie la revenirea la presiunea atmosferică şi pentru creşterea autonomiei scufundării.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis ce folosesc oxigen pur, nu pot fi utilizate la adâncimi mai mari de 7…10 m pentru evitarea apariţiei fenomenului de hiperoxie. Aceste aparate sunt utilizate de către scafandri de luptă şi, în general, sunt concepute după aproximativ aceeaşi schemă de principiu (fig. 3.14). La toate tipurile de astfel de aparate cu oxigen, adâncimea de scufundare este limitată la 7...10 m, autonomia este de 3…4 ore, iar la revenirea către suprafaţă scafandrul nu trebuie să efectueze decompresie. Prin urmare, aparatele cu oxigen cu circuit închis sunt caracterizate printr-un randament al scufundării ridicat. Cu toate avantajele prezentate mai sus, utilizarea acestor aparate prezintă unele riscuri în sensul că poate să apară criza hiperoxică în cazul depăşirii presiunii parţiale a oxigenului limită, deci în cazul depăşirii adâncimii limită de scufundare, sau intoxicaţia cu dioxid de carbon în cazul funcţionării necorespunzătoare a cartuşelor epuratoare.

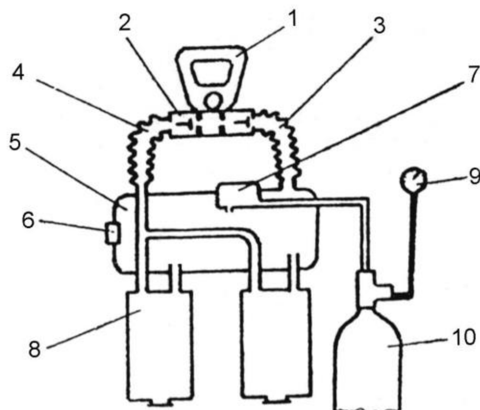


Fig. 3.14. Schema de principiu a unui aparat de respirat sub apă autonom, cu circuit închis:
1- mască facială cu piesă oronazală;
2- bloc supape;
3- furtun inspiraţie;
4- furtun expiraţie;
5- sac respirator;
6- supapă de siguranţă;
7- detentor;
8- cartuşe epuratoare pentru reţinere CO_2;
9- manometru de control presiune din butelie;
10- butelie oxigen.

Din punct de vedere al circuitului respirator aparatele de respirat sub apă autonome cu circuit închis, cu oxigen, se împart în două categorii:
- aparate cu circuit respirator închis, cu oxigen, în sistem pendular;
- aparate cu circuit respirator închis, cu oxigen, în sistem circular.

3.4.1.1. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, LAR VI

Aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen pur ca gaz respirator şi cu debit la cerere, LAR VI (fig. 3.15), este un aparat militar cu regenerare fabricat de firma DRÄGER. Oxigenul utilizat, cu o puritate de 99,5% în volum, circulă într-un

circuit închis. Calcea sodată, care este absorberul de dioxid de carbon, aflată în interiorul cartuşului epurator, fixează dioxidul de carbon conţinut în gazul expirat. Oxigenul consumat este completat din butelia de oxigen în două moduri diferite funcţie de intensitatea respiraţiei, după cum urmează:

- în cazul unei intensităţi normale a respiraţiei, prin intermediul automatului pulmonar (detentorul situat pe sacul respirator) care se deschide la cerere;
- în cazul unei intensităţi a respiraţiei suplimentare, printr-un robinet de by-pass (montat în derivaţie) controlat manual.



Fig. 3.15. Aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, LAR VI.

Schema de principiu a aparatului de LAR VI, este prezentată în figura 3.16.

Aparatul LAR VI, din punct de vedere al amprentei magnetice şi amprentei acustice, este în conformitate cu standardele NATO.

Adâncimea maximă de scufundare este de 10 m (această adâncime fiind reglementată de standardele naţionale pentru scufundări cu oxigen pur), iar durata de utilizare în imersiune depinde de consumul de oxigen deci de nivelul de activitate subacvatică. Domeniul de temperatură la care poate fi folosit acest aparat în scufundare este cuprins în intervalul –1…+35^{0}C.

Buteliile de gaz (de oxigen pur) aferente aparatului sunt fabricate în patru variante funcţie de standardele NATO. Capacitatea sacului respirator este de aproximativ 5,5 *l*. Volumul de calce sodată de tipul DiveSorbPro, folosit la o scufundare, este de aproximativ 2,7 *l*. Funcţie de varianta de butelie folosită, greutatea în aer a aparatului este situată în intervalul 12…14 kgf. În apă, aparatul LAR VI are o greutate neutră (flotabilitate nulă) pentru sacul respirator umflat cu aproximativ 2 *l* de oxigen. Dimensiunile aparatului sunt: lungimea de 425 mm, lăţimea de 300 mm şi adâncimea de 170 mm.

La un consum de oxigen de 1,8 l_N/min, folosind ca absorber calcea sodată recomandată de producător (DiveSorbPro), aparatul poate să opereze la o temperatură de +2^{0}C între 140 min şi 180 min, iar la o temperatură de +10^{0}C între 150 min şi 180 min. Diferenţa între limita maximă şi minimă a timpului de operare la diferite adâncimi este dată de faptul că aparatul poate să fie dotat cu un înveliş de izolaţie termică sau nu. Aparatul LAR VI provine din perfecţionarea aparatului LAR V.

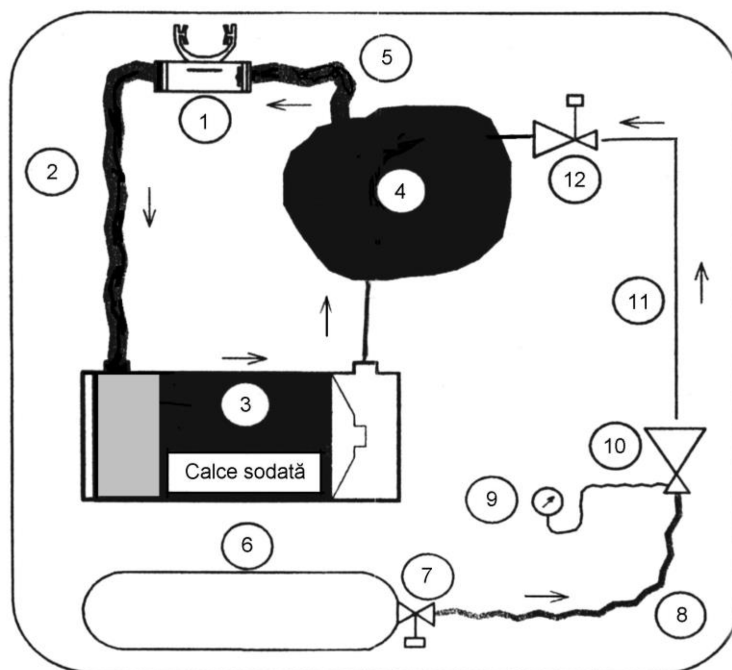


Fig. 3.16. Schema circuitului de gaz pentru aparatul cu oxigen în circuit închis LAR VI:
1- piesă bucală cu muştiuc; 2- furtun de expiraţie; 3- cartuş epurator pentru CO_2; 4- sac respirator; 5- furtun de inspiraţie; 6- butelie cu oxigen; 7- robinet butelie; 8- linia de înaltă presiune; 9- manometru de înaltă presiune; 10- reductor de presiune (detentor treapta I); 11- linia de medie presiune; 12- valvă cu deschidere la cerere (detentor treapta a II-a).

Principala diferenţă între cele două aparate constă în faptul că aparatul LAR V este un aparat cu amprentă magnetică, butelia de oxigen fiind fabricată într-o singură variantă şi anume în varianta magnetică. Principalele componente ale aparatului LAR V se pot folosi şi la aparatul LAR VI. Întotdeauna, când se va face o astfel de schimbare, va trebui verificată noua amprentă magnetică a aparatului. Standardele NATO cu privire la amprenta acustică sunt respectate de ambele aparate.

Pregătirea aparatului LAR VI pentru scufundare urmăreşte, în principal, următoarea succesiune de operaţii:

- se demontează canistra cu calce sodată în vederea umplerii cu acest material absorbant. Această operaţie se execută numai înaintea scufundării, iar între scufundări canistra nu va sta plină;
- se umple canistra cartuşului epurator cu calce sodată;
- după umplere, canistra se montează la loc; pentru temperaturi mai mici de 10^0C se montează şi învelişul izolator;
- se verifică etanşeitatea aparatului la subpresiune: după o perioadă de testare de aproximativ trei minute, trebuie ca sacul respirator să rămână încă pliat sub acţiunea subpresiunii, el neavând voie să se destindă (să se umfle);
- se verifică presiunea oxigenului din butelie. Aceasta trebuie să fie de 200 bar (sc. man.), iar în caz contrar trebuie să se umple butelia;
- se verifică din nou etanşeitatea la subpresiune;
- scafandrul se echipează cu aparatul de scufundare. După echipare, scafandrul va inspira pe gură şi va expira pe nas de mai multe ori până când se aude cum se deschide automatul pulmonar şi pătrunde oxigenul dinspre butelie către sacul respirator.

Aparatul este gata de utilizare numai după ce au fost efectuate toate verificările. Mai întâi se va proba aparatul în apă până la brâu, abia apoi se va efectua scufundarea în apă adâncă. Pe timpul utilizării aparatului, în imersie, la intervale regulate, scafandrul va citi manometrul de control verificând astfel periodic rezerva de oxigen disponibilă. Se va planifica în aşa fel scufundarea încât butelia de oxigen să nu se golească sub o presiune a oxigenului stocat de 10 bar (sc. man.).

Pătrunderea apei sau a umezelii în circuitul respirator al aparatului face aparatul de neutilizat. Întotdeauna, înainte ca muştiucul să fie scos din gură, pentru a preîntâmpina pătrunderea apei sau a umezelii în circuitul de respiraţie al aparatului, se va etanşeiza muştiucul prin închiderea valvei rotative şi tragerea manetei în jos.

După utilizare, aparatul se demontează, se goleşte canistra de masa de absorbant, se curăţă, se dezinfectează, iar apoi se usucă.

Aparatul model LAR VI.1, cu un kit de modernizare, poate să folosească şi amestec respirator prefabricat. Prin această modernizare aparatul LAR VI.1 devine echivalent cu aparatul LAR VII Standard.

3.4.1.2. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, FROGS

Aparatul FROGS (fig. 3.17), este un aparat robust, simplu şi de înaltă performanţă din gama aparatelor de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, fiind produs de firma franceză AQUA LUNG.

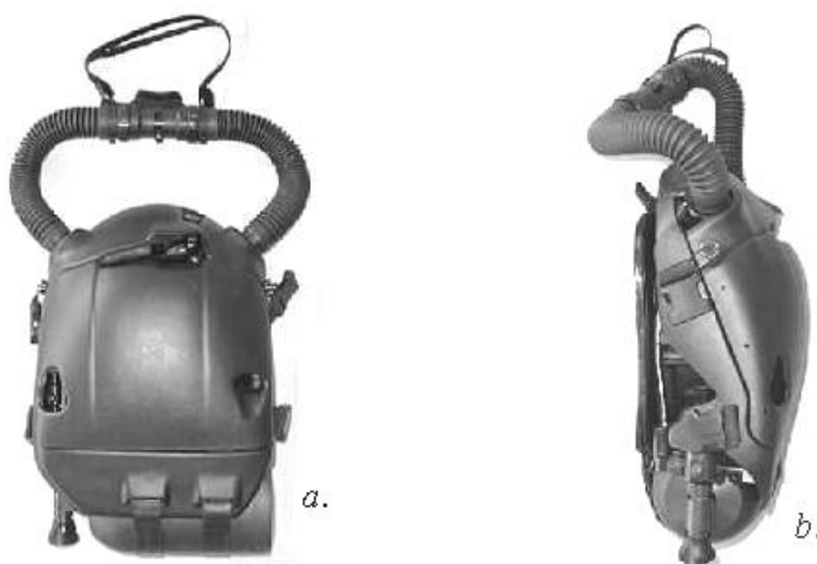


Fig. 3.17. Aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, FROGS:
a. Vedere frontală; *b*. Vedere laterală.

Aparatul este containerizat putând fi purtat, cu adaptări minime, atât pe piept cât şi pe spate. În figura 3.18 se prezintă schemele funcţionale ale aparatului FROGS în fazele de expiraţie şi inspiraţie.

Principalele caracteristici ale aparatului de respirat sub apă FROGS sunt:

- greutatea totală este de 14,3 kgf;
- dimensiunile sunt: 480 mm $\times$ 300 mm $\times$ 190 mm;
- buteliile de oxigen sunt amagnetice, fabricate din aluminiu, având o capacitate de 2,1 *l* la o presiune maximă de 200 bar (sc. man.);
- cartuşul epurator cu calce sodată are o capacitate de 2,5 kg masă absorbantă;
- volumul maxim al sacului respirator este de 4,5 *l*;

- oxigenul la ieşirea din aparat are o presiune de 9,2 bar (± 1 bar);
- amprenta magnetică şi acustică sunt în concordanţă cu standardele NATO;
- autonomia aparatului este de aproximativ 4 ore.

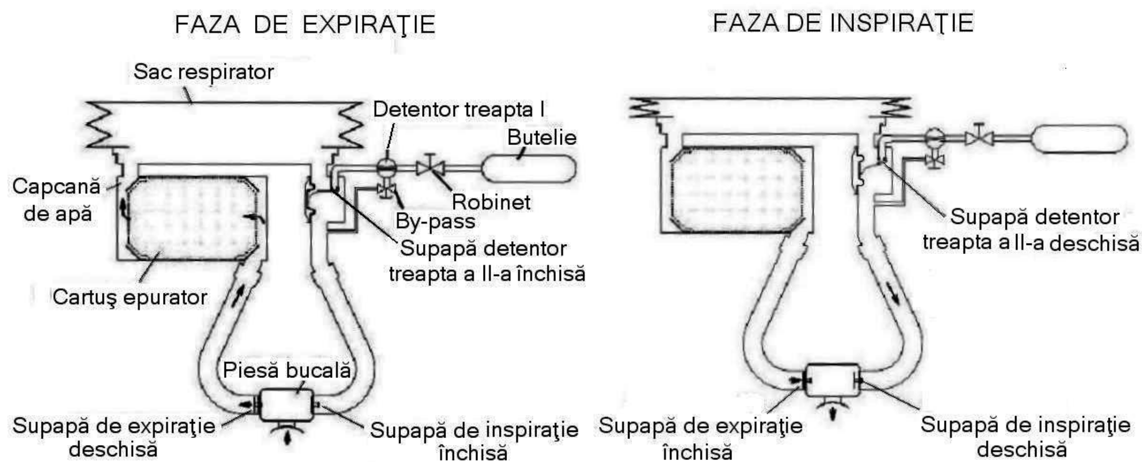


Fig. 3.18. Schemele funcţionale ale aparatului FROGS în fazele de expiraţie şi inspiraţie.

3.4.1.3. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, CODE

Aparatul de respirat sub apă CODE (fig. 3.19) este un aparat în sistem circular cu livrarea gazului respirator la cerere. Cantitatea de oxigen pe care o poate consuma scafandrul variază funcţie de condiţia fizică a acestuia şi de dificultatea activităţii pe care o desfăşoară, fiind cuprinsă între 0,5 l_N/min şi 2,5 l_N/min.



Fig. 3.19. Scafandru de luptă echipat cu aparat de respirat sub apă cu oxigen în circuit închis, CODE.

La o medie de 1,5 l_N/min (cantitatea medie de oxigen consumată de un scafandru antrenat), cu o butelie plină de oxigen (cca. 120 l_N), aparatul asigură o autonomie de aproximativ 45 minute.

Oxigenul consumat este introdus automat, printr-un regulator, în sacul respirator.

Principalele caracteristici ale aparatului de respirat sub apă CODE sunt:

- dimeniunile sunt: lăţime 380 mm, înălţime 400 mm, grosime 135 mm;
- autonomia este de aproximativ 45 minute;
- butelia de oxigen este de 0,6 *l* la o presiune de 200 bar (sc. man.);

- capacitatea buteliilor este de 0,6 l x 201 bar ≅ 120 l_N de oxigen;
- capacitatea canistrei de calce sodată este de 0,9 *l*;
- volumul sacului respirator este de 4,5 *l*;
- greutatea aparatului este de 5 kgf.

Aparatul de respirat sub apă **CODE** (**C**ompact **O**xigen **D**iving **E**quipment), este utilizat de către scafandri de luptă şi este fabricat de firma AQUA LUNG.

3.4.1.4. Aparatul LAR VII Standard funcţionând în varianta cu oxigen în circuit închis

Aparatul de respirat sub apă autonom LAR VII Standard (fig. 3.20) este fabricat de firma DRÄGER şi, funcţie de necesităţile operative, funcţionează în circuit închis cu oxigen, sau în circuit semiînchis cu amestec respirator binar NITROX. Înainte de utilizare, funcţie de planul scufundării, se alege una din cele două variante de utilizare. Trecerea de la o variantă de funcţionare la alta se efectuează la suprafaţă.



Fig. 3.20. Aparatul de respirat sub apă LAR VII Standard (lucrează în circuit închis sau în circuit semiînchis).

a. Varianta de funcţionare în circuit închis, cu oxigen, a aparatului LAR VII Standard

Pentru varianta de funcţionare în circuit închis, oxigenul este livrat printr-un automat pulmonar (detentor ataşat sacului respirator) către sacul respirator aferent aparatului de respirat sub apă.

Presiunea de evacuare trebuie să fie reglată la supapa de suprapresiune pe poziţia "închis". Din circuitul respirator iese gaz numai atunci când acesta se destinde în cazul unei ieşiri rapide la suprafaţa apei şi nu mai poate fi cedat mediului în mod controlat de către scafandru. Aparatul poate fi utilizat în varianta cu oxigen de către scafandri de luptă, pentru operaţii militare la adâncimi cuprinse în domeniul 0…10 m.

b. Principiul de funcţionare a aparatului LAR VII Standard, în varianta cu circuit închis, cu oxigen

Conform schemei de principiu din figura 3.21, atunci când se deschide butelia de oxigen (11), oxigenul curge către valva de comandă pulmonară (18) care joacă rolul de detentor treapta a II-a, prin reductorul de presiune (15) care joacă rolul de detentor treapta I. Presiunea oxigenului din butelie este indicată la manometrul de înaltă presiune (17).

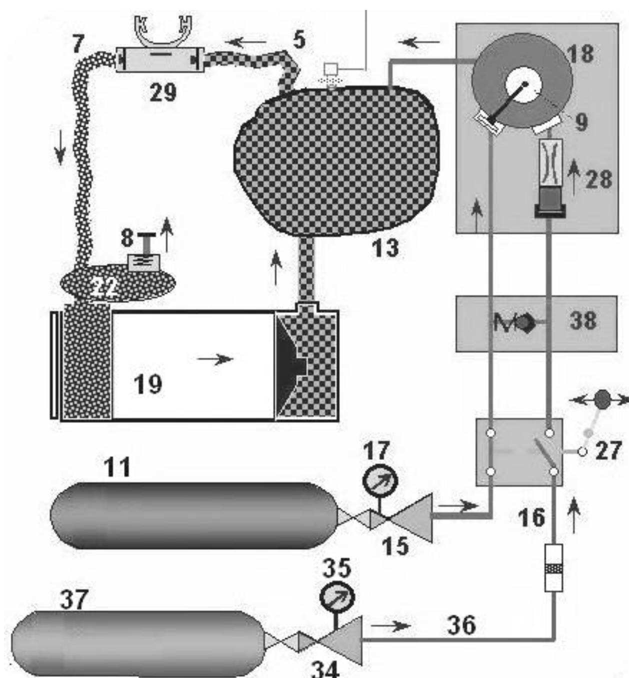


Fig. 3.21. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă LAR VII Standard:
5- furtun de inspiraţie; 7- furtun de expiraţie; 8- supapă de evacuare; 9- valvă de by-pass; 11- butelie cu oxigen; 13- sac respirator; 15- reductor de presiune pentru oxigen;
16- conductă racord la butelia cu amestec; 17- manometru butelie oxigen; 18- automat pulmonar; 19- cartuş epurator pentru CO_2; 22- distribuitor; 27- bloc comutare; 28- unitate de dozare; 34- reductor presiune pentru amestec; 35- manometru butelie amestec;
36- conductă de racordare; 37- butelie cu amestec de gaze; 38- supapă de reţinere.

Fişa de contact a unităţii de dozare (27) a valvei de comandă pulmonară se introduce cu partea sa pătrată. Marcajul în relief "O_2" se poate vedea cu uşurinţă. Sacul respirator (13) se alimentează cu oxigen proaspăt de la valva de comandă pulmonară, la comanda plămânului fals (sacul respirator) (13). Atunci, când este deschisă valva rotativă aferentă piesei bucale, prin furtunul de inspiraţie (5), supapa de inspiraţie şi muştiuc, oxigenul ajunge la scafandru.

Gazul expirat de către scafandru este împins prin supapa de expiraţie, furtunul de expiraţie (7) şi distribuitorul (22) la cartuşul epurator cu material absorbant (calce sodată) pentru reţinerea dioxidului de carbon (19). Supapa de suprapresiune (8) rămâne închisă. Circuitul se închide cu transportul de gaz purificat de dioxid de carbon de la cartuşul epurator către sacul respirator (13). Oxigenul consumat din sacul respirator este completat cu oxigen proaspăt prin valva de comandă pulmonară (18).

3.4.1.5. Aparatele cu circuit închis, cu oxigen, EMERSON RIG şi SIVA 10

Aparatul de respirat sub apă cu oxigen în circuit închis EMERSON RIG (fig. 3.22) este un aparat conceput de U. S. Navy pentru echiparea scafandrilor de luptă în vederea efectuării de operaţii cu caracter militar.

Aparatul, utilizat pe scară largă de către U. S. Navy, este un echipament cu oxigen pur, fără expirare de bule de gaz în mediul exterior. De aceea, acest aparat este utilizat în operaţii militare clandestine.

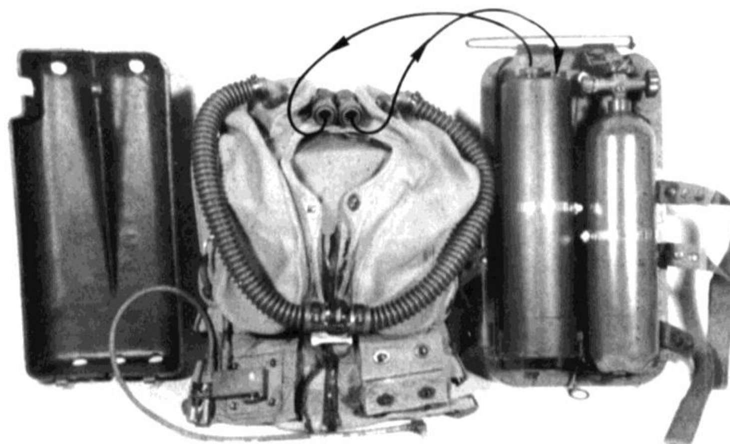


Fig. 3.22. Aparatul de respirat sub apă EMERSON RIG.
Săgeţile indică traseul de recirculare.

În continuare sunt prezentate câteva performanţe principale ale aparatului:

- Adâncimea nominală: 7,6 m;
- Durata scufundării: 75 min;
- Adâncimea maximă: 12 m;
- Debitul de oxigen este reglat manual de către scafandru prin intermediul unei valve montată pe vestă.

Un alt aparat de respirat sub apă autonom, cu oxigen în circuit închis la fel de performant este aparatul SIVA 10 fabricat de firma canadiană CARLTON LIFE SUPPORT TECH. Ltd. Şi acest aparat este utilizat tot în vederea efectuării de misiuni cu caracter militar.

În continuare sunt prezentate principalele caracteristici ale aparatului SIVA 10:

- Aparatul este cu circuit închis cu oxigen pur, şi este amplasat pe pieptul scafandrului;
- Aparatul este construit din materiale amagnetice şi antiacustice conform specificaţiilor NATO;
- Durata materialului absorbant pentru CO_2 (calcea sodată): 4 ore la 0^0C;
- Injecţie automată de gaz, la cerere;
- Adâncimea nominală: 8 m;
- Adâncimea maximă: 10 m.

3.4.1.6. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, CASTORO 96 PRO

CASTORO 96 PRO (fig. 3.23) este un aparat de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, produs de firma OMG din Italia special conceput pentru a fi utilizat pentru scufundări cu caracter civil. Este unul dintre puţinele modele de aparate de acest tip folosite şi de scafandri civili. Firma Poseidon a produs aparatul OXYLON cu caracteristici asemănătoare.

Aparatul CASTORO 96 PRO este purtat pe piept, iar oxigenul este furnizat manual de către scafandru prin intermediul robinetului by-pass.
Date tehnice:

- Adâncime maximă: 6 m;
- Capacitate canistră: 2,5 kg Soda Lime;
- Durata scufundării: 20°C - 240 min;
  4°C – 130 min;
- Capacitate sac respirator: 8,5 l;
- Temperatura de funcţionare: -2…40^{0}C;
- Capacitate butelie oxigen: aluminiu: 1,5 *l* la 232 bar;
  oţel: 2 *l* la 232 bar;
- Dimensiuni: 400 x 400 x 110 mm;
- Greutate: 8,4 kg pe uscat.



Fig. 3.23. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, CASTORO 96 PRO

3.4.1.7. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, DIVEX SHADOW

SHADOW este un aparat de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, cu debit la cerere, produs de firma britanică DIVEX (fig. 3.24). Acest aparat prezintă o amprentă magnetică foarte scăzută conform NATO STANAG 2897 Class A şi este utilizat în operaţiuni militare de recunoaştre, de deminări şi de luptă.

Aparatul prezintă un scăzut nivel de lucru mecanic respirator.

Date tehnice:

- Adâncime de utilizare: 0...15 m;
- Durata scufundării: maxim 6 ore;
- Greutate: 12 kg pe uscat, flotabilitate neutră în apă;
- Circuit de oxigen: automat la cerere şi în circuit deschis pentru securitate;
- Butelii: 2 *l* la 200 bar sau optional 2 *l* la 300 bar;
- Canistra: 3,5 kg.

Aparatul este prevăzut cu sistem de comunicaţii subacvatic Divex Digicom Diver Through Water Communications (DTWC) ce poate fi folosit până la distanţa de 3000 m.



Fig. 3.24. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, DIVEX SHADOW

3.4.1.8. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, OXYDIVE

OXYDIVE este un aparat cu circuit închis cu oxigen livrat scafandrului la cerere, produs de firma suedeză Interspiro în anul 1982 pentru operaţiuni militare clandestine (fig. 3.25). Aparatul este montat pe pieptul scafandrului împreună cu vesta de salvare. Este prevăzut cu robinet de by-pass şi cu supapă de securitate ce se deschide la presiune mai mare de 20 cmH_2O.

Câteva date tehnice:

- Adâncime maximă: 8 m;
- Butelie de oxigen standard de 1,5 *l* la 200 bar şi nonmagnetică de 1,5 *l* la 200 bar;
- Canistra: durata de 3 ore;
- Greutate: 13 kg încărcat cu Soda Lime;
- Dimensiuni: 500 x 350 x 190 mm.

Firma Poseidon a mai produs într-un număr restrâns recirculatoarele în circuit semiînchis cu debit masic constant ACSC în anul 1978 şi DCSC (fig. 3.25) în anul 1992.



Fig. 3.25. Aparatele cu circuit închis, cu oxigen, OXYDIVE (stânga) şi DCSC (dreapta)

3.4.2. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT ÎNCHIS, CU AMESTEC RESPIRATOR

Pentru a se putea pătrunde la adâncimi mai mari de 7…10 m realizându-se o autonomie mare şi un randament al scufundării ridicat, s-au pus la punct aparate de respirat sub apă cu circuit închis, cu amestecuri respiratorii la care concentraţia oxigenului este variabilă funcţie de adâncime, astfel încât presiunea parţială a acestuia să fie suficient de mică încât să se menţină sub nivelul de toxicitate şi suficient de mare încât să se reducă cât mai mult posibil timpul de decompresie.

La aceste aparate se pune problema stabilităţii compoziţiei amestecului respirator într-un anumit interval de valori în jurul unei valori teoretice, numai pentru adâncimi sub 100 m. La adâncimi mai mari, datorită concentraţiei scăzute a oxigenului în amestecul respirator (spre exemplu de 1% la adâncimea de 400 m), menţiunea acesteia într-un anumit interval este foarte dificilă şi de aceea nu asigură o securitate corespunzătoare scafandrului. Din acest motiv, s-au construit aparate care asigură în mod automat necesarul de amestec respirator prin două metode:

- injectarea oxigenului într-o cantitate adecvată în amestecul de bază;
- amestecarea automată a oxigenului şi a gazului inert.

Aparatele cu circuit închis cu amestecuri respiratorii sunt mai complexe, necesitând o analiză continuă a concentraţiei oxigenului din amestecuri şi controlul sistemului de monitorizare a presiunii parţiale a acestuia. O dată oxigenul consumat de către scafandru, sistemul de monitorizare a presiunii parţiale a oxigenului din amestecul de respirat, compară această valoare cu o valoare de referinţă şi injectează în circuit oxigen pur printr-o electrovalvă, până când presiunea parţială a oxigenului este readusă la valoarea normală. În acest fel, singurul gaz adăugat în sistem, la aceeaşi adâncime, este oxigenul necesar arderilor metabolice. La schimbarea adâncimii de lucru, în sistem se introduce şi gaz inert pentru a se putea asigura volumul corespunzător noii presiuni hidrostatice. Controlul presiunii parţiale a oxigenului se face de obicei la fiecare două secunde.

3.4.2.1. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, DOXGERS

Aparatul de respirat sub apă DOXGERS produs de firma U.S. DIVERS, a cărui schemă de principiu este prezentată în figura 3.26, se bazează pe amestecarea locală a oxigenului şi a gazului inert, iar presiunea parţială a oxigenului este reglabilă operaţional de către scafandru şi menţinută constantă printr-un sistem de senzori ce comandă electrovalvele. Cu excepţia sistemului de injectare a oxigenului, aparatul DOXGERS funcţionează ca şi aparatele clasice, în care un volum constant de amestec respirator este circulat printr-un sac respirator completat cu gaz inert, în timp ce presiunea parţială a oxigenului este reglată în mod automat. Aparatul are o autonomie de aproximativ o oră la o adâncime de 300 m, scafandrul fiind adus la această adâncime cu turela presurizabilă aferentă unui sistem de scufundare.

3.4.2.2. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MK10 MOD 4

Aparatul american de respirat sub apă tip MK10 MOD 4 a cărui schemă este prezentată în figura 3.27, este un aparat autonom care se utilizează în scufundări cu plecare din turela de scufundare presurizabilă sau din barocamera minisubmarinului purtător de scafandri, până la adâncimea maximă de 450 m, are o autonomie de circa 4 ore şi următoarele funcţii principale:

- sesizează presiunea parţială a oxigenului din amestecul respirator şi o menţine în limitele prescrise de tehnologie;

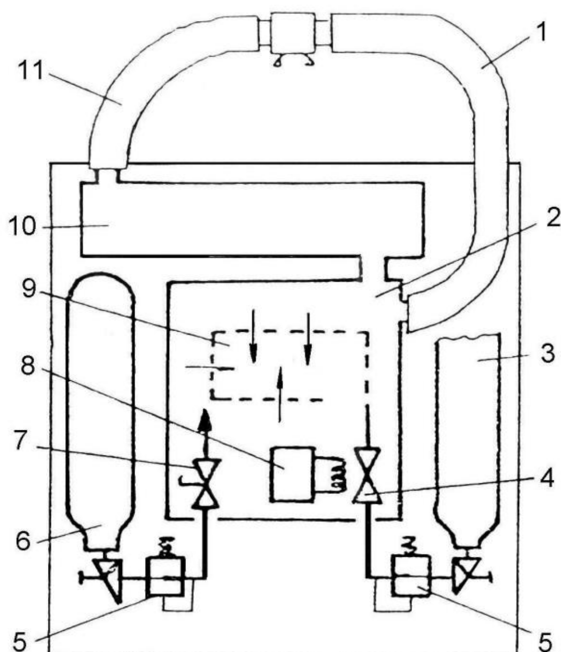


Fig. 3.26. Schema aparatului de respirat sub apă cu amestec, în circuit închis, DOXGERS:
1- furtun inspiraţie;
2- sac respirator;
3- butelie cu oxigen;
4- electrovalvă;
5- detentor treapta I;
6- butelie heliu;
7- clapet joasă presiune;
8- detentor oxigen;
9- difuzor;
10- cartuş epurator pentru CO_2;
11- furtun expiraţie.

- reţine dioxidul de carbon din amestecul respirator;
- menţine amestecul respirator din aparat la presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii la care se află scafandrul;
- funcţionează ca aparat cu circuit închis, cu sisteme de control adecvate.

Aparatul MK 10 MOD 4 foloseşte două gaze de alimentare: oxigen pur stocat într-o butelie cu o capacitate de 532 l_N şi gaz diluant (aer, amestec gazos sintetic sau gaz inert pur) stocat într-o butelie de 432 l_N. Aparatul funcţionează în cele trei moduri prezentate anterior: automat, manual şi de avarie.

Scafandrul expiră, prin furtunul de expiraţie, în epuratorul de dioxid de carbon. Mai întâi, gazul expirat trece printr-un filtru cu silicagel pentru reţinerea umidităţii, apoi trece prin filtrul de epurare cu absorbant, pentru reţinerea dioxidului de carbon, iar, în final, gazul expirat trece din nou printr-un filtru cu silicagel pentru a se înlătura umiditatea generată de reacţia chimică a absorbantului.

Toate aceste filtre sunt montate într-un cartuş din material inoxidabil. La partea superioară a cartuşului filtrant sunt montaţi trei senzori electrochimici pentru presiunea parţială a oxigenului, în vederea monitorizării amestecului respirator la ieşirea din epurator. Doi dintre aceşti senzori sunt conectaţi la un modul electronic care, la fiecare două secunde compară semnalele primite cu nivelul impus de tehnologie.

Aparatul funcţionează pentru două niveluri de presiune parţială a oxigenului, care pot fi alese de scafandri. Nivelul inferior este pentru scufundare obişnuită, pe când nivelul superior este folosit pentru accelerarea decompresiei.

Al treilea senzor de oxigen transmite informaţii scafandrului asupra presiunii parţiale a oxigenului pe un display prins ca un ceas pe încheietura mâinii. Modulul electronic este alimentat de 20 de baterii cadmiu-nichel reîncărcabile pentru maximum 250 de cicluri operaţionale.

Modelul conţine patru rezistoare variabile folosite pentru calibrări, o pereche fiind folosită pentru calibrarea primilor doi senzori, iar cealaltă pereche pentru calibrarea presiunilor parţiale ale oxigenului.

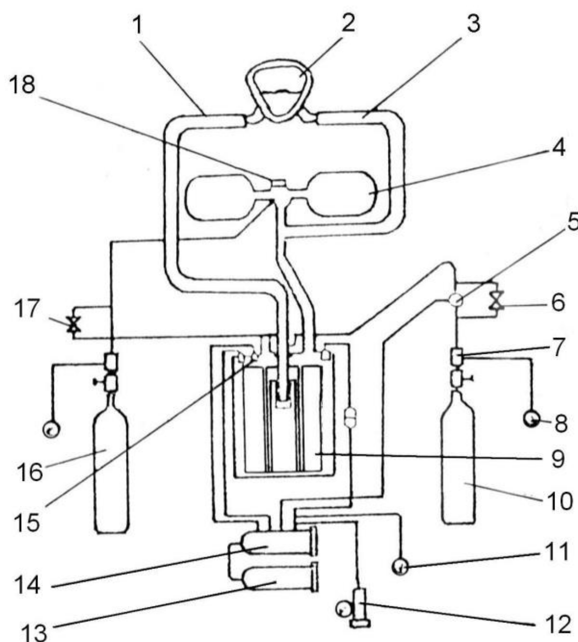


Fig. 3.27. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit închis, cu amestec, MK 10 MOD 4:
1- furtun expiraţie;
2- mască facială;
3- furtun inspiraţie;
4- saci respiratori;
5- vană injecţie oxigen;
6- by-pass;
7- detentor treapta I;
8- manometru control;
9- cartuş epurator;
10- butelie oxigen;
11- display oxigen;
12- întrerupător;
13- baterii;
14- modul electronic;
15- senzori oxigen;
16- butelie gaz inert;
17- vană adaus gaz inert;
18- supapă de siguranţă.

Gama disponibilă pentru nivelul inferior al presiunii parţiale a oxigenului este 0,2…1,0 bar (sc.abs.), iar pentru nivelul superior este de 0,95…1,25 bar (sc.abs.).

Gazul inert trece printr-un distribuitor spre sacul respirator. În circuit se află un detentor treapta a II-a care alimentează în sistemul la cerere circuitul cu gaz inert. Admisia gazului inert în sistem se face de fiecare dată când presiunea hidrostatică creşte cu circa 1 m H_2O, fiind reglată a se face în limitele 1,0…2,5 m H_2O.

O problemă importantă în pregătirea aparatului pentru scufundări constă în alegerea gazului inert şi în calculul consumului de oxigen şi de gaz inert. Gazul inert utilizat poate fi orice gaz inert potrivit adâncimii maxime de scufundare. Pentru adâncimi de până la 40 m se recomandă folosirea aerului sau a amestecului HELIOX cu 80% heliu şi 20% oxigen. Pentru adâncimi de peste 40 m, amestecul respirator se alege funcţie de adâncimea maximă de lucru.

3.4.2.3. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MK 15

Aparatul de respirat sub apă cu amestec respirator, funcţionând în circuit închis, MK 15 (fig. 3.28), este un aparat conceput de U.S. Navy pentru operaţii militare specifice scafandrilor de luptă.

Acest aparat a fost conceput în mod special pentru a fi utilizat de către scafandri din echipele speciale UDT/SEAL. Aparatul menţine, în mod automat, o presiune parţială a oxigenului de 0,7 bar (sc.abs.), controlată electronic cu senzori electrochimici. Aparatul este prevăzut cu două butelii de formă sferică, una pentru gazul diluant, cealaltă pentru oxigen. Scafandrul respiră amestecul gazos, la cerere, în funcţie de necesităţi, prin intermediul unei măşti faciale.

În continuare sunt prezentate câteva din principalele caracteristici ale aparatului:

- Adâncimea maximă: 45 m;

- Durata utilizării unei încărcături cu calce sodată: 6 ore la 26^0C şi 2 ore şi 40 min. la 4^0C.

Acest aparat utilizează tabele proprii de decompresie fiind echipat cu un calculator de scufundare electronic.

3.4.2.4. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, PRISM-TOPAZ

Aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, cu livrarea de amestec respirator către scafandru, PRISM-TOPAZ (fig. 3.29), este un aparat fabricat de firma americană STEAM MACHINES. Acest aparat este destinat activităţilor cu caracter civil.

Aparatul este utilizat în special de către scafandri care efectuează scufundări în peşteri sau la epave, însoţite de activităţi de fotografiere şi filmare.

Faţă de celelalte tipuri de aparate, acesta prezintă avantajul că poate fi utilizat în toate cele trei modalităţi: în circuit închis, în circuit semiînchis şi în circuit deschis.

Atât în cazul funcţionării în circuit închis, cât şi în cazul funcţionării în circuit semiînchis, concentraţia de oxigen este menţinută la o valoare constantă. La funcţionarea în circuit semiînchis, aparatul utilizează injectarea unui debit masic constant în sistem. Funcţionarea în circuit deschis, poate fi utilizată ca rezervă, în caz de urgenţă scafandrul respirând direct amestecul respirator din acelaşi detentor, prin comutare manuală.

În continuare sunt arătate câteva caracterictici ale aparatului:

- Sacul respirator este plasat pe pieptul scafandrului;
- Durata de utilizare a unei încărcături cu calce sodată: 6,5 ore pentru 1,7 kg;
- Adâcimea nominală: 45 m;
- Adâncimea maximă: 150 m.

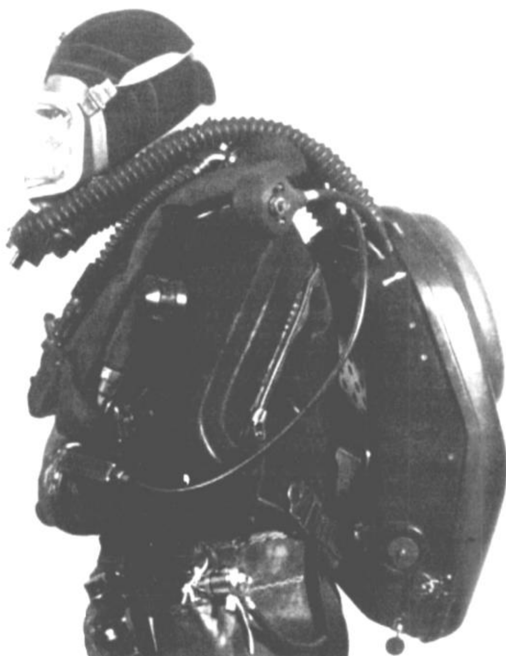


Fig. 3.28. Scafandru militar echipat cu aparat de respirat sub apă, cu amestec în circuit închis, MK 15.



Fig. 3.29. Scafandru echipat cu aparat de respirat sub apă, cu circuit închis, cu amestec, PRISM-TOPAZ.

3.4.2.5. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, CISLUNAR MK5

Aparatul de respirat sub apă cu circuit închis MK 5P este ultima versiune, a aparatelor recirculatoare în circuit închis produse de CISLUNAR (fig. 3.30).

În această versiune, au fost incluse multe îmbunătăţiri cum ar fi: multipli senzori de monitorizare a presiunii parţiale de O_2, mai mulţi microprocesori, mai multe surse electrice de alimentare, precum şi mai multe surse de afişare. Toate aceste sisteme pot funcţiona atât împreună cât şi independent pentru situaţii de urgenţă.

Sacul respirator este prevăzut, la umeri, cu două dispozitive de captare a apei în caz de inundare accidentală a furtunului care dirijează apa către sacul respirator, unde este purjată de scafandru.

Unul din senzorii de monitorizare a presiunii parţiale de O_2 (fig. 3.31) este inclus într-un calculator de scufundare pentru multiple amestecuri respiratorii binare sau trimix. Cu acest calculator, scafandrul poate comuta de pe un amestec pe altul în timpul scufundării, precum şi în circuit deschis în caz de urgenţă.



Fig. 3.30. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, CISLUNAR MK5.



Fig. 3.31. Senzor de monitorizare a presiunii parţiale a O_2.

În timpul comutării, calculatorul continuă să monitorizeze şi să calculeze profilul de decompresie pentru amestecul respectiv.

Pe piesa bucală este montat un afişaj digital astfel că scafandrul poate monitoriza în orice moment informaţii critice asupra scufundării (presiune parţială a O_2, decompresie, adâncime).

O altă inovaţie a aparatului o constituie o membrană impermeabilă folosită pentru a proteja canistra cu absorbant de o eventuală inundare accidentală a circuitului de inspiraţie.

Membrana permite accesul gazului respirator şi împiedică pătrunderea apei. Astfel, se poate schimba canistra chiar şi sub apă în timpul efectuării palierului de decompresie.

Trecerea la respiraţie în circuit deschis se face prin intermediul unui detentor treapta a II-a integrat în piesa bucală.

De asemenea, scafandrul poate folosi diferite tipuri de măşti faciale.

Date tehnice suplimentare:

- Adâncime maximă: 152 m;
- Capacitate canistră: 4…12 ore cu Sofnolime sau 6…14 ore cu Lithium Hydroxide;
- Greutate: 28 kg.

3.4.2.6. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, CLASIC KISS

Firma canadiană Jetsam Industries produce aparatul de respirat sub apă cu circuit închis CLASIC KISS (fig. 3.32) în anul 2000, urmat de varianta mai perfecţionată SPORT KISS în anul 2004. Ambele modele funcţionează în circuit închis cu debit volumic constant, fiind primele modele de recirculatoare civile care au acest sistem de injecţie al oxigenului.

Recirculatoarele KISS nu au primit certificare CE (EN 14143, EN 61508).

Oxigenul este furnizat în circuit fie prin debit constant, fie manual prin intermediul supapei manuale.

În modul debit continuu, debitul de oxigen este furnizat în circuit prin intermediul unui orificiu cu diametrul de 0,0035 mm. Debitul de oxigen este reglabil şi poate fi setat pînă la maxim 1 l_N /min., dar valoarea normală este pentru 0,5…0,7 bar.

În modul manual, oxigenul este introdus în circuit prin apăsarea butonului de admisie din supapa manuală, în funcţie de adâncimea scufundării şi de activitatea depusă.

Furnizarea amestecului gazos se face automat în debit volumic constant prin intermediul unei supape automate de injecţie ce compensează compresia sacului respirator, în timpul coborârii, în funcţie de adâncime, sau când scafandrul a inspirat complet din furtunul de inspir.

Amestecul gazos poate fi aer comprimat sau TRIMIX, precum şi NITROX pentru scufundări la adîncime mică.

Presiunea parţială a oxigenului este controlată de trei senzori tip R22D Teledyne (fig. 3.33), independenţi unul de celălalt. Ambele modele sunt prevăzute şi cu posibilitate de funcţionare în circuit deschis în caz de urgenţă (hipercapnie, hiperoxie, hipoxie sau inundare accidentală a circuitului închis).



Fig. 3.32. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, CLASIC KISS.



Fig. 3.33. Senzori tip R22D Teledyne.

Date tehnice:

- Adâncime maximă: CLASIC KISS: 75 m;
  SPORT KISS: 50 m;
- Capacitate butelii: ambele modele sunt prevăzute cu 2 butelii de 368 l_N din aluminiu, pentru oxigen şi diluant;
- Capacitate canistră: CLASIC KISS: 2,3 kg Sofnolime (canistră axială);
  SPORT KISS: 2,3 kg Sofnolime (canistră bi-axială);

- Dimensiuni: CLASIC KISS: 54 x 36 x 20 cm;
  SPORT KISS: 56 x 51 x 13 cm;
- Greutate: CLASIC KISS: 22 kg;
  SPORT KISS: 17,5 kg.

3.4.2.7. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, INSPIRATION

Aparatul de respirat sub apă cu amestec INSPIRATION (fig. 3.34) este un aparat în circuit închis produs de firma AP Diving din Marea Britanie. Prima variantă a apărut în anul 1996, urmată apoi în anul 2005 de variante mai perfecţionate, INSPIRATION VISION şi EVOLUTION VISION.

Aparatele INSPIRATION şi EVOLUTION sunt cele mai răspândite recirculatoare special concepute pentru scufundări cu caracter civil, estimându-se un număr de peste 5000 de modele aflate în folosinţă. Inspiration este şi primul aparat recirculator ce a primit certificarea CE (EN 14143, EN 61508).

Aparatele sunt prevăzute cu trei senzori electrochimici model Vision, pentru monitorizarea presiunii parţiale de oxigen, produşi de aceeaşi firmă, precum şi cu un calculator Vision ce afişează o gamă largă de informaţii asupra aparatului şi parametrilor de scufundare, inclusiv decompresia în apă şi intervalul la suprafaţă.

În caz de urgenţă, scafandrul poate comuta imediat pe circuit deschis, alimentarea cu amestec respirator făcându-se direct din piesa bucală prin intermediul detentorului treapta a II-a incorporat.

Furnizarea amestecului gazos se face automat prin intermediul unei supape automate de injecţie ce compensează compresia sacului respirator din timpul coborârii, în funcţie de adâncime.



Fig. 3.34. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, INSPIRATION.

Pe piesa bucală este montat un afişaj digital, astfel că scafandrul poate monitoriza în orice moment informaţii critice asupra scufundării (presiune parţială a O_2, decompresie, adîncime).

Aparatele Inspiration şi Evolution folosesc ca amestec respirator aer comprimat, amestec HELIOX sau amestec TRIMIX.

Presiunea parţială de oxigen este setată la suprafaţă la valoarea de 0,7 bar, iar în timpul coborârii este setată de către scafandru la 1,3 bar.

Aparatele INSPIRATION şi EVOLUTION prezintă date tehnice comune, cu excepţia dimensiunilor şi a greutăţii care sunt în funcţie de mărimea canistrei cu absobant:

- Adâncime maximă: Aer: 40 m;
  HELIOX:100 m;
  TRIMIX: 110 m;
- Temperatura de funcţionare: 4…32^0C;
- Dimensiuni: INSPIRATION: 650 x 450 x 350 mm ;
  EVOLUTION: 480 x 410 x 350 mm;
- Greutate: INSPIRATION: 29,5 kg;
  EVOLUTION: 24,7 kg;
- Volum sac respirator: 14 *l*;
- Butelii: 2 butelii din oţel cu oxigen şi diluant (capacitate diluant de 538 l).
- Capacitate canistră: INSPIRATION: 2,45 kg Sofnolime;
  EVOLUTION: 2,1 kg Sofnolime;
- Consolă de monitorizare Vision prevăzută şi cu un senzor de căldură pentru măsurarea consumului de absorbant;
- Baterie: Fujitsu Lithium 6 volt, tip CRP2;
- Precizia consolei electronice Vision: ± 0.05 bar;
- Valori de setare p_{O2}: minim: 0,5…0,9 bar;
  maxim: 0,9…1,5 bar;
- Valori avertizare p_{O2}: 0,4…1,6 bar;
- Altitudine (presiune atmosferică): 650…1080 mbar;
- Calculatorul de scufundare Vision poate afişa informaţii în mai multe limbi: Engleză, Germană, Olandeză, Italiană, Spaniolă, Franceză, Portugheză, Cehă şi Daneză.

3.4.2.8. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, OUROBOROS

OUROBOROS este numele unui aparat de respirat sub apă cu circuit închis, cu amestec, cu senzori electrochimici, produs de firma Closed Circuit Research Ltd din Marea Britanie în anul 2005 (fig. 3.35). Aparatul este conceput special pentru scufundări civile.

Aparatul OUROBOROS este certificat CE (EN14143:2003).

Cartuşul epurator este radial (amestecul respirator circulă dinspre centru spre margine) şi, în acest mod, absorbantul este folosit mai eficient (90 minute la 100 m, 150 minute la 40 m, 210 minute la 15 m).

Aparatul este prevăzut cu posibilitatea de a evacua pătrunderea accidentală a apei prin furtunul şi sacul respirator de expir care are, la partea inferioară, o supapă de evacuare ce va elimina apa odată cu surplusul de gaz.

Informaţiile aparatului precum şi parametrii de scufundare sunt monitorizaţi de un display principal având trei baterii cu o durată de 25…30 ore de funcţionare, un display secundar cu propria sursă de baterii, independent de primul şi un display montat pe piesa bucală. Acesta are patru semnale optice de diferite culori (alb, roşu, albastru) ce indică informaţii despre aparat, decompresie, funcţionare corectă a senzorului electrochimic şi respectiv p_{O2} (valoare minimă 0,7 bar, valoare maximă 1,2…1,4 bar).

De asemenea, în spatele aparatului se află încă un display ce poate fi observat de către un alt scafandru.



Fig. 3.35. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, OUROBOROS:
1- senzor electronic p_{O2} ;
2- furtun ;
3- butelie O_2 ;
4- butelie gaz diluant ;
5- carcasă din kevlar.

Amestecul gazos este alimentat automat prin supapa de injecţie automată.

Carcasa exterioară este din kevlar, aparatul având o greutate de 32 kg cu absorbant în canistră.

Alte date tehnice:

- Adâncime maximă: 40 m cu aer, 100 m cu HELIOX;
- Capacitate canistră: 3,6 sau 4,4 kg Sofnolime 797;
- Capacitate sac respirator: 5,5 *l*;
- Butelii: oxigen şi diluant cu capacitatea de 2 *l* fiecare la 232 bar;
- Temperatura optimă de funcţionare: 4…32^{0}C.

3.4.2.9. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MK 6 DISCOVERY

Aparatul MK 6 DISCOVERY (fig.3.36)este un aparat de respirat sub apă cu circuit închis, cu amestec, produs de firma Poseidon în anul 2007, special pentru scufundări cu caracter sportiv sub curba de securitate.

Aparatul utilizează amestec respirator la care presiunea parţială a oxigenului din amestecul respirator rezultat este menţinută între 0,4…1,3 bar.

În funcţie de adâncime, concentraţia oxigenului poate fi de 28...100%, iar concentraţia de azot de 0…79%.

Aparatul este prevăzut cu un sistem electronic inovator de autocalibrare şi de monitorizare permanentă a senzorilor presiunii parţiale de oxigen, atât înainte de scufundare cât şi în timpul scufundării.

Furnizarea amestecului gazos se face automat prin intermediul unei supape automate de injecţie ce compensează compresia sacului respirator din timpul coborârii în funcţie de adâncime. Aparatul MK 6 DISCOVERY dispune de un panou principal de afişare a parametrilor aparatului şi ai scufundării, precum şi nu mai puţin de cinci sisteme separate de avertizare sonore, vizuale şi tactile.

În caz de urgenţă, scafandrul poate comuta imediat pe circuit deschis, alimentarea cu amestec respirator făcându-se direct din piesa bucală prin intermediul detentorului treapta a II-a incorporat.



Fig. 3.36. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MK 6 DISCOVERY.

Alte date tehnice:

- Adâncime maximă: 40 m;
- Temperatura optimă de funcţionare: 4…35^{0}C;
- Dimensiuni: 53 x 41 x 18 cm;
- Greutate: 15 kg pe uscat;
- Capacitate sac respirator: 4 sau 6 *l*;
- Capacitate canistră: 2,7 kg SofnoDive 797 pentru 3 ore de scufundare;
- Capacitate butelii din aluminiu: oxigen:3 *l* la 100 bar ;
  diluent : 3 *l* la 210 bar;
- Certificare CE: (EN 14143, EN 61508).

3.4.2.10. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MEGALODON

Firma americană Inner Space Systems produce în anul 2002 aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, cu amestec, MEGALODON APECS (fig. 3.37) cu senzori electrochimici, iar în anul 2007 varianta MEGALODON COPIS tot în circuit închis dar cu injecţie de oxigen la debit volumic constant şi manual. Recirculatorul MEGALODON APECS este certificat CE (EN 14143, EN 61508).

Ambele modele au fost special concepute pentru scufundări civile în peşteri sau la epave, la mare adâncime. În prezent, pe plan mondial, se află în folosinţă peste 800 de unităţi de recirculatoare MEGALODON.

Aparatul MEGALODON APECS este prevăzut cu trei senzori electrochimici Teledyne R-22D.

Monitorizarea parametrilor aparatului şi ai scufundării (adâncime, durată, p_{O2} care poate fi setată la valorile: 0,4; 0,7; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3 sau 1,4 bar) se face cu două calculatoare separate (fig. 3.38). Scafandrul poate monitoriza, în orice moment, informaţii critice asupra scufundării (presiune parţială a O_2, decompresie, adîncime) pe afişajul digital montat pe piesa bucală.

Amestecurile gazoase folosite pot fi aer comprimat, NITROX sau TRIMIX. Furnizarea amestecului gazos se face automat prin intermediul unei supape automate de injecţie.



Fig. 3.37. Recirculatorul în circuit închis MEGALODON APECS.



Fig. 3.38. Calculator pentru afișarea parametrilor scufundării.

Recirculatorul MEGALODON COPIS funcţionează tot în circuit închis, prin injecţie manuală de oxigen prin intermediul supapei manuale, dar nu are senzori electrochimici de monitorizare p_{O2}. Scafandrul trebuie să monitorizeze p_{O2} prin cei trei senzori de monitorizare.

Recirculatorul MEGALODON COPIS poate fi folosit şi pentru scufundări în lacuri situate la altitudinea maximă de 4 481 m. Setarea p_{O2} în funcţie de altitudine se face prin intermediul calculatorului.

Date tehnice (ambele modele):

- Adâncime maximă: 150 m;
- Canistra: tip axial cu capacitatea de 2,5 kg de SofnoLime 797 sau Sodasorb şi durata de 4,5 ore; tip radial la care durata este de 6…9 ore;
- Capacitatea sac respirator: 5 *l*;
- Greutate: 35 kg cu absorbant.

3.4.2.11. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, rEVO

Aparatul de respirat sub apă cu amestec, rEvo (fig. 3.39) este un aparat recirculator în circuit închis, produs în Belgia în două variante fabricate: cu debit volumic constant şi injecţie manuală şi cu senzori electrochimici.

În varianta cu debit volumic constan, injecţia de oxigen are loc prin intermediul unui ajutaj de 0,0035 mm şi un regulator de presiune la o presiune constantă de 11 bar şi un debit de 0,75 l/min. Presiunea parţială de oxigen este monitorizată prin intermediul unui display rEvodream montat pe piesa bucală şi a unui calculator (fig. 3.40). Injecţia manuală de oxigen se face cu supapa manuală a sistemului.

Varianta electronică are senzori electrochimici care reglează, în mod automat, injecţia de oxigen la p_{O2} constantă indiferent de adâncime. Scafandrul monitorizează p_{O2} prin intermediul unui display principal de tip Hammerhead şi a unuia secundar de tip rEvodream ce indică valorile de p_{O2} în culori portocaliu, verde, roşu, precum şi celelalte informaţii ale aparatului sau parametrii scufundării.

Ambele modele au câte două canistre cu Sofnolime cu capacitatea de 1,4 kg fiecare poziţionate în linie (axial sau radial) şi conectate cu un colier de prindere. În timpul scufundării, absorbantul din canistra de la partea superioară va fi folosit primul, iar după scufundare scafandrul o va înlocui cu cealaltă canistră de la partea inferioară.

Dezavantajul acestui sistem constă în faptul că o parte din absorbantul canistrei inferioare rămâne neutilizat.

De asemenea, aceste aparate sunt prevăzute cu câte două butelii de 3 *l* fiecare pentru oxigen şi diluant şi cu supapă de injecţie automată a amestecului respirator.

Furtunul respirator este un furtun adaptat ce provine de la modelul Dräger Ray al firmei Dräger, iar pe piesa bucală se află disply-ul cu informaţii ale p_{O2}.

Alte date tehnice:

- Adâncimea maximă de utilizare: varianta cu debit volumic constant: 80 m;
  varianta electronică: 100 m;
- Durată canistre: canistre axiale 2,7 kg fiecare: 2...3 ore;
- canistre radiale 4 kg fiecare: 4…6 ore;
- Volum sac respirator: 6 *l*;
- Greutatea aparatului este de 28 kg.



Fig. 3.39. Recirculatorul rEVO III cu senzori electrochimici.



Fig. 3.40. Calculatoare pentru afișarea parametrilor scufundării.

3.4.2.12. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, STEALTH

Aparatul STEALTH (fig. 3.41) este un aparat în circuit închis produs de Divex pentru toate tipurile de operaţiuni militare, aflându-se în dotarea mai multor forţe navale printre care Germania, Italia, Franţa, India. Aparatul este de construcţie non-magentică conform NATO STANAG 2897 Class A și zgomot redus conform NATO STANAG 1158 / AMP 15. Prezintă rezistenţă sporită la şoc şi vibraţii.



Fig. 3.41. Scafandru militar cu un aparat cu circuit închis, cu amestec, STEALTH.

Presiunea parţială a oxigenului setată la nivelul dorit, este monitorizată de trei senzori electrochimici.

În timpul operaţiunilor militare, aparatul STEALTH poat fi utilizat până la adâncimea de 54 m cu amestec NITROX şi 100 m cu amestec HELIOX sau TRIMIX.

Scafandrul respiră amestecul gazos, la cerere, în funcţie de necesităţi, prin intermediul unei măşti faciale.

Aparatul are următoarele performanţe:

- Durată de scufundare: 4...6 ore;
- Temperatură optimă de păstrare: –20ºC …+ 50ºC;
- Temperatură de utilizare (apă de mare): –1ºC …+ 37ºC;
- Temperatură de utilizare (apă dulce): 1ºC …37ºC.

În caz de urgenţă, de defectare a circuitului închis principal, aparatul este prevăzut cu o butelie pentru circuit deschis, încărcată cu aer sau amestec HELIOX la presiunea de 300 bar.

3.4.2.13. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MR9800

Aparatul MR9800 (fig. 3.42) este un aparat în circuit închis pentru aplicaţii militare de deminare, operaţiuni clandestine etc. utilizat de U. S. Navy, Royal Navy, Australian Navy.

Aparatul posedă o amprentă magnetică scăzută.

Aparatul este prevăzut cu robinet de by-pass manual, mască facială pentru respirat şi două sisteme independente de monitorizare a presiunii parţiale de oxigen.

Sistemul de afişare principal este format din mai multe led-uri (light emitting diodes – LED) ce indică valoarea presiunii parţiale a oxigenului şi un semnal de avertizare.

Sistemul secundar este de tip display purtat de scafandru la mână şi indică valori ale adâncimii, presiuni parţiale a oxigenului, adâncimii, duratei scufundării, presiunii din buteliile cu oxigen şi diluant, nivelului bateriilor principale şi de rezervă, precum şi diferite semnale de avertizare.



Fig. 3.42. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MR9800.

Alte date tehnice:

- Adâncime maximă: 90 m;

- Capacitate canistră: 3,5 kg, suficient pentru 6 ore de scufundare;
- Butelii de oxigen şi diluant: 2,87 *l* la 240 bar;
- Presiune parţială O_2: 0,75...1,3 bar;
- Trei senzori electrochimici separaţi;
- Durata bateriei: >18 ore;
- Greutate: 30 kg, flotabilitate neutră în apă;
- Dimensiuni: 68 x 43 x 31 cm .

3.4.2.14. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, VIPER E

Aparatul VIPER E (fig. 3.43)este un aparat de respirat sub apă cu circuit închis, cu amestec, pentru aplicaţii militare de deminare şi operaţiuni clandestine, produs de firma canadiană COBHAM. Aparatul are o amprentă magnetică scăzută.

Aparatul este prevăzut cu robinet de by-pass manual, mască facială pentru respirat şi două sisteme independente de monitorizare a presiunii parţiale de oxigen.

Sistemul de afişare principal este format din mai multe led-uri (light emitting diodes – LED) ce indică valoarea presiunii parţiale a oxigenului şi un semnal de avertizare.



Fig. 3.43. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, VIPER E.

Sistemul secundar este de tip display purtat de scafandru la mână şi indică valori ale adâncimii, presiuni parţiale a oxigenului, adâncimii, duratei scufundării, presiunii din buteliile cu oxigen şi diluant, nivelului bateriilor principale şi de rezervă, precum şi diferite semnale de avertizare.

Alte date tehnice:

- Adâncime maximă: 100 m;
- Capacitate canistră: 4 ore de scufundare;
- Capacitate butelii cu oxigen şi diluant: 680 l_N fiecare la 242 bar;
- Setare presiune parţială O_2: 0,75; 1,30; 1,35 bar;
- Dimensiuni: 725 x 500 x 240 mm;
- Greutate: 30 kg pe uscat;
- Durata de funcţionare a bateriilor: 18 ore.

4.

APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS ŞI MIXT

4.1. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS. GENERALITĂŢI

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis sunt aparate la care o parte din amestecul gazos expirat este evacuat în mediul acvatic exterior, cealaltă parte fiind reciclată şi reintrodusă în circuitul de respiraţie după ce a fost trecută, în prealabil, printr-un cartuş epurator unde este reţinut dioxidul de carbon. Presiunea parţială a oxigenului din amestecurile utilizate este menţinută în limitele de securitate, fără a se creşte prea mult presiunea parţială a gazului inert care determină, de fapt, durata revenirii la presiunea atmosferică (durata decompresiei).

Aceste aparate sunt alcătuite din butelii de stocaj cu amestecuri binare azot–oxigen (NITROX) sau heliu–oxigen (HELIOX), sau cu amestecuri ternare TRIMIX, ($He–N_2–O_2$ sau $Ne–N_2–O_2$), regulator de presiune treapta I, sac respirator şi sistem de livrare automată a debitului de amestec respirator către consumator. Aceste aparate, atunci când sunt autonome, sunt caracterizate printr-o autonomie ridicată şi printr-un randament al scufundării crescut. Atunci când se doreşte un timp de scufundare mai ridicat, se procedează la alimentarea cu amestec respirator sintetic de la suprafaţă sau dintr-un mijloc imersat, realizându-se prin aparatul cu circuit semiînchis o economie de amestec respirator. Adâncimea maximă de scufundare cu astfel de aparate este de 54 m în cazul utilizării amestecurilor NITROX şi peste 54 m în cazul utilizării amestecurilor HELIOX sau TRIMIX. De asemenea şi aceste aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis pot fi de două feluri funcţie de debitul de amestec livrat consumatorului:

- aparate cu circuit semiînchis, *cu debit masic constant*;
- aparate cu circuit semiînchis, *cu debit volumic constant*.

4.2. TIPURI DE APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis pot fi, funcţie de modul de preparare a amestecului respirator, de două feluri:

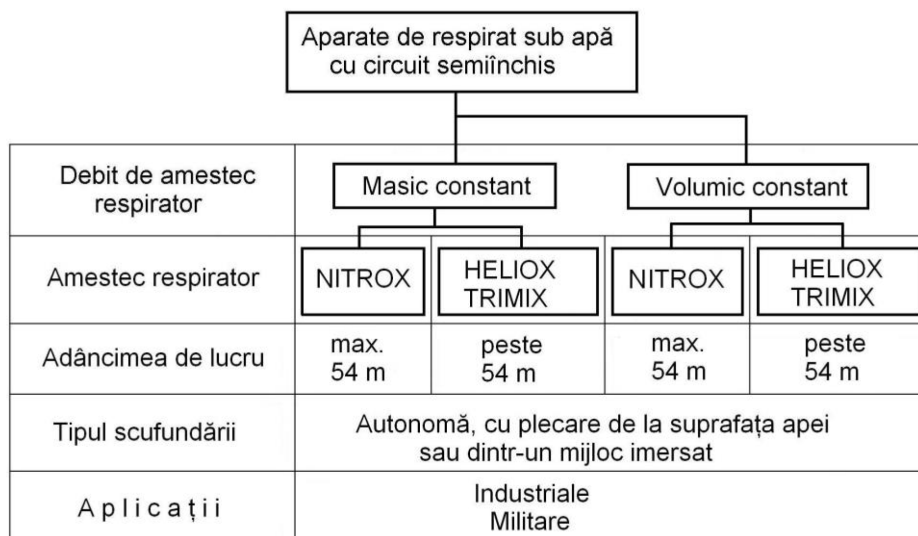
- aparate cu circuit semiînchis, *cu amestec prefabricat;*
- aparate cu circuit semiînchis, *cu amestec preparat local.*

Din prima categorie fac parte aparatele la care stocajul de amestec de gaz este realizat în instalaţii specializate, iar buteliile acestor aparate sunt umplute cu acest amestec respirator prefabricat.

Din cea de-a doua categorie fac parte aparatele la care stocajul de gaze este alcătuit din stocajul de oxigen şi stocajul de gaz inert (gaz diluant al oxigenului), fiecare din cele două gaze fiind înmagazinate în butelii separate. Amestecarea celor două gaze, în vederea obţinerii amestecului respirator dorit, se realizează local, în interiorul aparatului, alimentarea circuitului de respiraţie cu acest amestec efectuându-se prin intermediul unui dispozitiv de dozare complex, de construcţie specială.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec respirator prefabricat, trebuie să furnizeze, în mod automat, un amestec gazos în care concentraţia oxigenului să scadă o dată cu creşterea adâncimii de scufundare, în aşa fel încât presiunea parţială a acestuia să rămână în limitele admisibile, sau un amestec gazos cu o concentraţie de oxigen constantă pe o anumită gamă de adâncimi.

În figura 4.1 este prezentată o schemă conţinând caracteristicile generale şi performanţele aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis.



NITROX = amestec binar azot–oxigen (N_2–O_2);
HELIOX = amestec binar heliu–oxigen (He–O_2);
TRIMIX = amestec ternar heliu–azot–oxigen (He–N_2–O_2).

Fig. 4.1. Schema generală cu caractersiticile, performanţele şi domeniile de aplicaţie pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis.

4.2.1. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS, CU AMESTEC RESPIRATOR PREFABRICAT

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis cu amestec prefabricat, sunt aparate la care amestecul respirator este preparat deja în instalaţii speciale fiind înmagazinat la presiune înaltă (200 bar (sc. man.) sau 300 bar (sc. man.)) în buteliile aferente aparatului de respirat. Acest amestec gata preparat este injectat, printr-un dispozitiv de dozare la debit constant, într-un sac respirator unde se combină cu amestecul expirat de către scafandru şi curăţat de dioxidul de carbon, fomând astfel amestecul respirat în mod efectiv de către scafandru. Acest amestec trebuie să

îndeplinească condiţiile privind limitele impuse presiunii parţiale a oxigenului din amestec pentru evitarea fenomenelor de hipoxie sau hiperoxie, urmărind totodată ca presiunea parţială a gazului inert din amestec să fie suficient de mică astfel încât adâncimea de scufundare să fie cât mai mare fără să se producă fenomenul de narcoză şi timpul de decompresie, dictat de presiunea parţială a gazului inert, să fie cât mai scurt.

Aparatele cu circuit semiînchis cu amestec respirator prefabricat sunt alcătuite în principal din butelii de stocaj umplute fie cu amestecuri binare azot-oxigen (NITROX) sau heliu-oxigen (HELIOX), fie cu amestecuri ternare heliu-azot-oxigen (TRIMIX), regulator de presiune treapta I, sac respirator, sistem de livrare automată a debitului de amestec dinspre detentorul treapta I către sacul respirator, supapă de evacuare a surplusului de amestec din sac şi cartuş epurator pentru dioxidul de carbon.

4.2.1.1. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DC55

Aparatul de respirat sub apă DC 55, (fig. 4.2), produs de firma AQUALUNG, este un aparat autonom cu circuit semiînchis, cu amestec de gaze prefabricat, utilizat în aplicaţii militare, care asigură stabilitatea compoziţiei amestecului respirat efectiv, prin eliminarea din circuit a unui volum de gaz proporţional cu ventilaţia. Conform schemei de funcţionare din figura 4.3, scafandrul respiră din aparat prin intermediul unei piese bucale (muştiuc), legată la două tuburi gofrate flexibile, fiecare având la capăt câte o supapă: de inspir (7), respectiv de expir (10). Plămânul artificial este alcătuit din două burdufuri concentrice şi anume din sacul respirator mare (4) şi sacul respirator mic (5). La expiraţie, amestecul gazos traversează cartuşul epurator (2) şi se repartizează în cele două burdufuri proporţional cu volumele acestora. În burduful mic, gazul intră printr-o supapă de transfer (8). În momentul inspiraţiei, plămânul artificial îşi micşorează volumul, iar gazul din burduful mic este evacuat în exterior printr-o supapă de evacuare (6) de construcţie specială. Deci, evacuarea este proporţională cu raportul volumelor celor două burdufuri.

Împrospătarea cu gaz se face la cerere. Atunci când cantitatea de gaz în mişcare diminuează datorită evacuării, consumului de oxigen şi fixării dioxidului de carbon de către calcea sodată, partea superioară a sacului respirator acţionează pârghia clapetului de admisie (9). Astfel, are loc împrospătarea cu gaz la presiune medie din buteliile de amestec respirator (1), prin intermediul detentorului (3).

Autonomia aparatului DC 55 este de maximum patru ore.

În funcţie de adâncime, amestecurile supraoxigenate folosite sunt:

- între 0 m şi 25 m se foloseşte amestec NITROX cu 60% oxigen şi 40% azot, autonomia fiind de 3 ore;
- între 25 m şi 45 m se foloseşte amestec NITROX cu 40% oxigen şi 60% azot, autonomia fiind de 25 min. (determinată de probleme de decompresie);
- între 45 m şi 55 m se foloseşte amestec NITROX cu 32,5% oxigen şi 67,5% azot, autonomia fiind de 30 min.

Scufundările cu amestecuri NITROX supraoxigenate sunt prin excelenţă cu profil militar. Aceste scufundări se execută de către scafandrii de luptă antimine submarine.



Fig. 4.2. Aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DC 55.

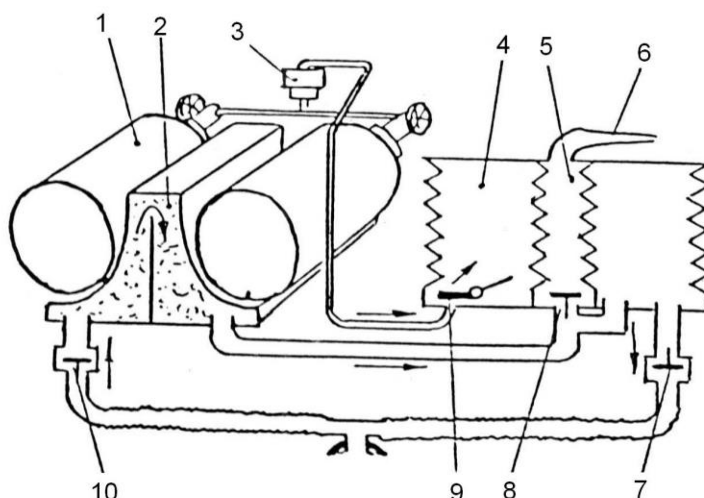


Fig. 4.3. Schema de principiu a aparatului cu circuit semiînchis DC 55.

Un alt aparat din aceeaşi categorie, dar mai performant datorită în special cartuşului filtrant, este aparatul de respirat sub apă MIXGERS 78 fabricat de firma FENZY. Construit pe acelaşi principiu, acest aparat permite utilizarea unui amestec respirator ternar TRIMIX alcătuit din 23% oxigen, 37% azot şi 40% heliu, în scufundări de 10 min. la adâncimea de 80 m, cu o decompresie în apă, cu oxigen. Oxigenul pur este furnizat printr-o narghilea la care scafandrul se leagă printr-un dispozitiv special, fără să părăsească muştiucul său.

4.2.1.2. Aparatul LAR VII Standard funcţionând în varianta cu amestec în circuit semiînchis

Aparatul de respirat sub apă autonom LAR VII Standard (fig. 4.4), fabricat de firma DRÄGER, poate funcţiona şi cu amestec gazos prefabricat în circuit semiînchis.

Pentru varianta de funcţionare în circuit semiînchis, se utilizează amestecul de gaze standard NATO, NITROX B (60% O_2, 40% N_2) livrat către sacul respirator. Cu ajutorul unui dispozitiv de dozare, circuitul respirator este alimentat cu amestec gazos proaspăt. Gazul excedentar iese prin supapa de suprapresiune şi distribuitorul de bule, în mediul acvatic exterior. Aparatul LAR VII Standard este conceput pentru un consum maxim de oxigen de 2,5 l_N/min. Dozarea gazului pentru amestecul de gaze ales este stabilită pentru consumul corespunzător nivelului de activitate impus, debitul fiind până la 5 l_N/min. De aici, rezultă că adâncimea de scufundare pentru amestecul respirator NITROX B este în domeniul 0…24 m.

Pentru reţinerea dioxidului de carbon din amestecul gazos expirat se utilizează un cartuş epurator care constă dintr-o canistră ce conţine o masă absorbantă (calce sodată) de tipul DiveSorbPro cu volumul de 2,5 *l* pentru o scufundare. La o temperatură cuprinsă între -2^0C şi $+40^0$C o canistră de calce sodată umplută corect cu masa absorbantă, asigură o autonomie de 150 min. Aparatul LAR VII Standard are dimensiunile: lungimea de 425 mm, lăţimea de 300 mm şi grosimea de 170 mm. Greutatea aparatului este de aproximativ 15 kg în aer şi neutră în apă, cu sacul respirator umflat cu circa 2 *l* oxigen. Aparatul poate fi utilizat în varianta cu amestec de către scafandrii deminori, la adâncimi de până la 24 m.



Fig. 4.4. Scafandru deminor echipat cu aparat LAR VII Standard (funcţionare în varianta cu amestec în circuit semiînchis).

4.2.1.3. Aparatul cu circuit semiînchis cu amestec prefabricat, FGT I

Aparatul de respirat sub apă, autonom, FGT I, (fig. 4.5) fabricat de firma germană DRÄGER, este un aparat cu circuit semiînchis utilizând amestecuri de gaze prefabricate. Acest aparat este conceput pentru activităţi cu caracter militar la adâncimi cuprinse între 0 m şi 54 m.



Fig. 4.5. Scafandru militar echipat cu aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, FGT I.

Aparatul FGT I are o amprentă magnetică scăzută şi o amprentă acustică redusă, conform normelor NATO, ceea ce îl face utilizabil pentru operaţiuni speciale.

Aparatul asigură o autonomie a scufundării de până la trei ore în funcţie de nivelul de efort al activităţii subacvatice depusă de scafandru. De asemenea, aparatul este cu dimensiuni reduse, este compact, uşor de utilizat şi de întreţinut.

În continuare, sunt prezentate datele tehnice mai importante ale aparatului:

- Principiul de funcţionare: aparat cu circuit semiînchis;
- Adâncimea de scufundare/timp de scufundare:
  - 0…24 m cu amestec NITROX B/aprox. 170 min;
  - 0…42 m cu amestec NITROX C/aprox. 100 min;
  - 0…54 m cu amestec NITROX D/aprox. 60 min;
- Amestecurile respiratorii tip NATO:
  - NITROX B (60% O_2, 40% N_2);
  - NITROX C (40% O_2, 60% N_2);
  - NITROX D (32,5% O_2, 67,5% N_2).
- Calcea sodată: Drägersorb 400, aprox. 3,5 ℓ pentru o scufundare;
- Dimensiunile: 660 mm lungime, 465 mm lăţime, 225 mm grosime;
- Greutatea aparatului pe uscat: aprox. 25 kgf;
- Caracteristicile buteliei cu amestec gazos: volumul interior 2,5 *l*, diametrul 117 mm, presiunea de operare 200 bar (sc. man.), materialul aluminum alloys are alloys in which aluminium (Al) is the predominant metal; the typical alloying elements are copper, magnesium, manganese, silicon, tin and zinc.

4.2.1.4. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DOLPHIN I

Aparatul de respirat sub apă autonom cu circuit semiînchis DOLPHIN I (fig. 4.6), fabricat de firma germană DRÄGER, este un aparat care foloseşte amestecuri respiratorii azot-oxigen (NITROX) supraoxigenate. Amestecul respirator NITROX este furnizat la debit constant şi această livrare este suplimentată de un detentor treapta a II-a pentru consum de oxigen mai mare în cazul unei activităţi subacvatice mai intense. Aparatul DOLPHIN I, care este un aparat de respirat sub apă utilizat în scufundări civile profesionale, prezintă multe avantaje faţă de aparatele în circuit deschis cum ar fi:

- consum de gaz respirator cu până la 95% mai puţin;
- timp de scufundare fără decompresie mai lung;
- decompresie efectuată în condiţii de mai mare siguranţă;
- echilibru termic mai lung datorită căldurii generate în cartuşul epurator;
- dimensiuni mai mici decât aparatele în circuit deschis;
- generează doar câteva bule mici.

Aparatul DOLPHIN I este alcătuit din următoarele componente principale: unitatea de bază cuprinzând cartuşul epurator şi sacul respirator, furtunurile respiratoare cu piesa bucală, detentorul treapta a II-a integrat sacului respirator, reductorul de presiune pentru gazul din butelie, harnaşamentul şi vesta de salvare cu lest integrat, butelia cu amestec NITROX de diferite mărimi şi butelia de securitate.

În continuare sunt prezentate datele tehnice semnificative ale aparatului:

- Principiul de funcţionare: aparat cu circuit semiînchis cu dozaj constant, cu sac respirator şi cartuş filtrant;
- Substanţă absorbantă pentru dioxidul de carbon: DiveSorb, aprox. 2,7 *l* pentru o scufundare;

- Sacul respirator: variaţie de volum între inspiraţie şi expiraţie de circa 4,5 *l*, volumul total fiind de 10,5 *l*;
- Dimensiuni: 520 mm lungime, 370 mm lăţime şi 235 mm grosime;
- Greutatea aparatului: 15 kgf pe uscat şi aproximativ neutră în apă;
- Volum interior butelie: 4 *l*;
- Presiune de încărcare butelie: 200 bar (sc. man.);
- Material butelie: oţel;
- Adâncimea scufundării/timp de scufundare:
  - 0…20 m pentru NITROX 60/40 (O_2/N_2)/125 min.;
  - 0…24 m pentru NITROX 50/50 (O_2/N_2)/95 min.;
  - 0…30 m pentru NITROX 40/60 (O_2/N_2)/67 min.;
  - 0…45 m pentru NITROX 32/68 (O_2/N_2)/47 min.



Fig. 4.6. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat DOLPHIN I.

4.2.1.5. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, ATLANTIS I

Aparatul de respirat sub apă autonom, cu circuit semiînchis ATLANTIS I (fig. 4.7), fabricat de firma DRÄGER, este un aparat care utilizează amestec de gaze prefabricat, în special NITROX.

Versiunea standard a aparatului care cântăreşte 15 kg pe uscat şi care are flotabilitate nulă în apă, este prevăzută cu o butelie având volumul interior de 4 *l* ce poate fi încărcată la o presiune maximă de 200 bar (sc. man.) şi este concepută astfel încât să garanteze o durată a scufundării de 110 min. la adâncimi cuprinse între 0 m şi 20 m.

Este posibilă şi utilizarea unor butelii cu volume interioare mai mari.



Fig. 4.7. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, ATLANTIS I.

Conţinutul buteliei cu amestec respirator este suficient pentru efectuarea unei scufundări cu o durată de 40 min. la adâncimea de 45 m. Tehnologia specifică acestui aparat, oferă scafandrilor un amestec azot-oxigen (NITROX) cu proporţiile componentelor de 40% oxigen şi 60% azot. Aparatul de respirat sub apă ATLANTIS I poate fi utilizat şi în scufundări cu caracter civil.

4.2.1.6. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat MK 6

Aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, utilizând amestec respirator prefabricat, MK 6 (fig. 4.8), este un aparat conceput de U.S. Navy pentru aplicaţii militare. Acest aparat a fost unul dintre aparatele standard ale U.S. Navy, utilizat pentru operaţiuni militare de către scafandri deminori. Aparatul poate utiliza atât amestec heliu-oxigen (HELIOX), cât şi amestec azot-oxigen (NITROX).

Aparatul MK 6 utilizează o injecţie la debit constant de gaz. Aparatul are în componenţă două butelii pentru gazul respirator (NITROX sau HELIOX) şi, într-o anumită configuraţie, o butelie cu oxigen, pentru efectuarea decompresiei în caz de urgenţă. Buteliile cu amestec gazos au fiecare capacitatea de 2400 l_N de amestec şi sunt încărcate la presiunea de 210 bar (sc. man.). Adâncimea maximă de utilizare a aparatului este de 60 m, iar durata scufundării este cuprinsă în intervalul 30 min…3 ore, fiind funcţie de temperatura apei şi de activitatea depusă.



Fig. 4.8. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, MK 6.

4.2.1.7. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, HALCYON

Aparatul de respirat sub apă, cu circuit semiînchis, utilizând amestec respirator prefabricat, HALCYON (fig. 4.9), este un aparat utilizat pentru scufundări civile, fiind fabricat de firma americană BROWNIES THIRD LUNG.

Aparatul este utilizat în special de către scafandri care efectuează scufundări în peşteri, scufundări la epave, scufundări civile la mare adâncime şi scufundări cu caracter ştiinţific.

Sacul respirator este fixat la spatele scafandrului. Spre deosebire de alte tipuri de aparate în circuit semiînchis, aparatul HALCYON alimentează scafandrul cu amestec respirator conform cerinţelor metabolice ale scafandrului, printr-o injecţie la debit masic constant. În consecinţă, cantitatea de amestec respirator este utilizată mai eficient (de circa opt ori mai eficient decât în cazul unui aparat cu circuit deschis).

Aparatul se caracterizează printr-o autonomie de peste 100 min. la adâncimea de 90 m. Aparatul utilizează un singur amestec respirator, stocat în două butelii. Aparatul HALCYON poate fi utilizat şi în circuit deschis în caz de urgenţă, scafandrul respirând direct amestecul respirator din acelaşi detentor.



Fig. 4.9. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, HALCYON.

4.2.1.8. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, AZIMUTH

În anul 1999, firma producătoare de echipament de scufundare Mares produce aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu debit constant, AZIMUTH (fig. 4.10). Aparatul este asemănător în construcţie şi funcţionare cu aparatele DRÄGER RAY, DRÄGER ATLANTIS/DOLPHIN, SUBMATIX. Aparatul AZIMUTH este certificat CE și a fost conceput special pentru scufundări cu caracter civil până la adâncimea de 33 m utilizând amestecuri NITROX cu o concentraţie de oxigen de 32%, 40% şi 50%:

- cu amestec NITROX cu 50% O_2 , adâncimea maximă este de 18 m;
- cu amestec NITROX cu 40% O_2 , adâncimea maximă este de 25 m;
- cu amestec NITROX cu 32% O_2 , adâncimea maximă este de 33 m.

Pentru fiecare amestec NITROX ales, scafandrul trebuie să calibreze la începutul scufundării, cu ajutorul unui debitmetru, debitul pentru amestecul NITROX respectiv:

- pentru amestec NITROX cu 32% O_2 / 68% N_2: 15,6 *l*/min;
- pentru amestec NITROX cu 40% O_2 / 60% N_2: 9,6 *l*/min;
- pentru amestec NITROX cu 50% O_2 / 50% N_2: 6,6 *l*/min.

Aparatul este prevăzut cu două butelii ce pot fi încărcate cu două amestecuri diferite de NITROX, unul pentru coborâre, urcare şi eventual decompresie, iar celălalt pentru adâncimea maximă a scufundării. Comutarea se face de către scafandru prin intermediul unui comutator special.

Alte date tehnice:

- Capacitate sac respirator: 2 x 6 *l*;
- Capacitate canistră: 2,35 kg de Sodalime;
- Durata de scufundare: 2,5 ore pentru NITROX 32% şi 4 ore pentru NITROX 60%);
- Temperatura optimă a apei: -1° + 35 °C;
- Greutate: 27 kg cu absorbant; flotabilitate neutră în apă.

Varianta AZIMUTH AF comercializată din anul 2002 în EU, foloseşte şi amestec TRIMIX şi poate fi utilizat până la adâncimea maximă de 120 m în funcţie de amestec. La această variantă, buteliile sunt de capacitate mai mare, de 2 x 10 *l* fiecare la 200 bar, sacul respirator de 6,2 *l* fiecare, iar greutatea de 45 kg cu absorbant și flotabilitate neutră în apă.



Fig. 4.10. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, AZIMUTH.

4.2.1.9. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, SUBMATIX

SUBMATIX 100 ST (fig. 4.11) este un aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis produs în Germania în anul 2003.

Aparatul a fost special conceput pentru scufundări cu caracter civil până la adâncimea maximă de 40 m, fiind asemănător în construcţie şi funcţionare cu recirculatoarele DRÄGER ATLANTIS, DRÄGER RAY și AZIMUTH. Este certificat CE fiind folosit şi comercializat în UE.

SUBMATIX 100 ST foloseşte amestecuri NITROX preparate având diferite concentraţii, amestecul fiind livrat scafandrului la debit constant.

Amestecurile care se pot folosi cu SUBMATIX 100 ST sunt de 80%, 60 %, 50 %, 40 %, 32 % concentraţie de oxigen pentru care se utilizează ajutaje de injecţie de dimensiune fixă, la un debit de 14,2…3,3 *l*/min.

Monitorizarea p_{O2} se face de către scafandru prin intermediul unui display ce poate fi purtat şi la încheietură.

Alte date tehnice:

- Butelii: 2 butelii din oţel de 2 *l* fiecare pentru amestec NITROX, la 200 bar (opţional butelii din aluminiu de 4 *l* fiecare);
- Capacitate canistră: 1,8 kg de Sofnolime (Divesorb, Sofnolime, Spherasorb, Soda Lime) cu durata de 3 ore;
- Temperatura optimă de funcţionare: +4°C … +34°C;
- Greutate: 15 kg cu absorbant;
- Dimensiuni: 670 x 390 x 170 mm.



Fig. 4.11. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, SUBMATIX.

4.2.2. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS, CU AMESTEC RESPIRATOR PREPARAT LOCAL

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, sunt aparate la care amestecul respirator este preparat chiar în interiorul aparatului folosind gaze pure şi anume oxigen şi gaz inert (gaz diluant pentru oxigen). Gazele din care se prepară amestecurile respiratorii proaspete sunt stocate la presiuni înalte în butelii separate. Prepararea amestecurilor se realizează cu ajutorul unui dispozitiv de dozare automată de mare complexitate şi precizie, la o concentraţie a gazelor din amestec funcţie de adâncimea de imersie.

Acest tip de aparate, spre deosebire de aparatele cu amestecuri prefabricate, realizează o optimizare mult mai bună a consumului de gaz şi măreşte posibilitatea de mişcare pe verticală a scafandrului precum şi gama de activităţi desfăşurate sub apă, în cadrul aceleiaşi scufundări.

4.2.2.1. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, SMT

Aparatul SMT (fig. 4.12 şi fig. 4.13) este un echipament de respirat sub apă cu circuit semiînchis care se adaptează în funcţie de adâncime. Aparatul operează cu amestec respirator preparat local prin amestecarea de oxigen cu gaz diluant. Amestecarea celor două componente se realizează prin intermediul unui dispozitiv de dozare. Firma DRÄGER a proiectat şi dezvoltat acest aparat pentru a fi folosit în operaţiuni subacvatice militare de deminare şi de salvare până la adâncimea de 60 m. În comparaţie cu aparatele de scufundare cu circuit deschis, aparatul SMT prezintă următoarele avantaje:

- permite o autonomie mai mare datorită utilizării eficiente a oxigenului;
- numărul buteliilor cu gaze respiratorii este mic, iar dimensiunile acestora sunt reduse comparativ cu cele ale buteliilor aparatelor cu circuit deschis;
- utilizarea amestecurilor binare adecvate, permite scafandrului să stea la adâncimea de lucru o perioadă mai mare de timp.

Cu toate aceste avantaje, aparatul de respirat sub apă SMT, comportă o serie de riscuri pe timpul scufundării dacă pregătirea aparatului şi efectuarea scufundării nu se execută în strictă conformitate cu normele specifice aflate în vigoare.

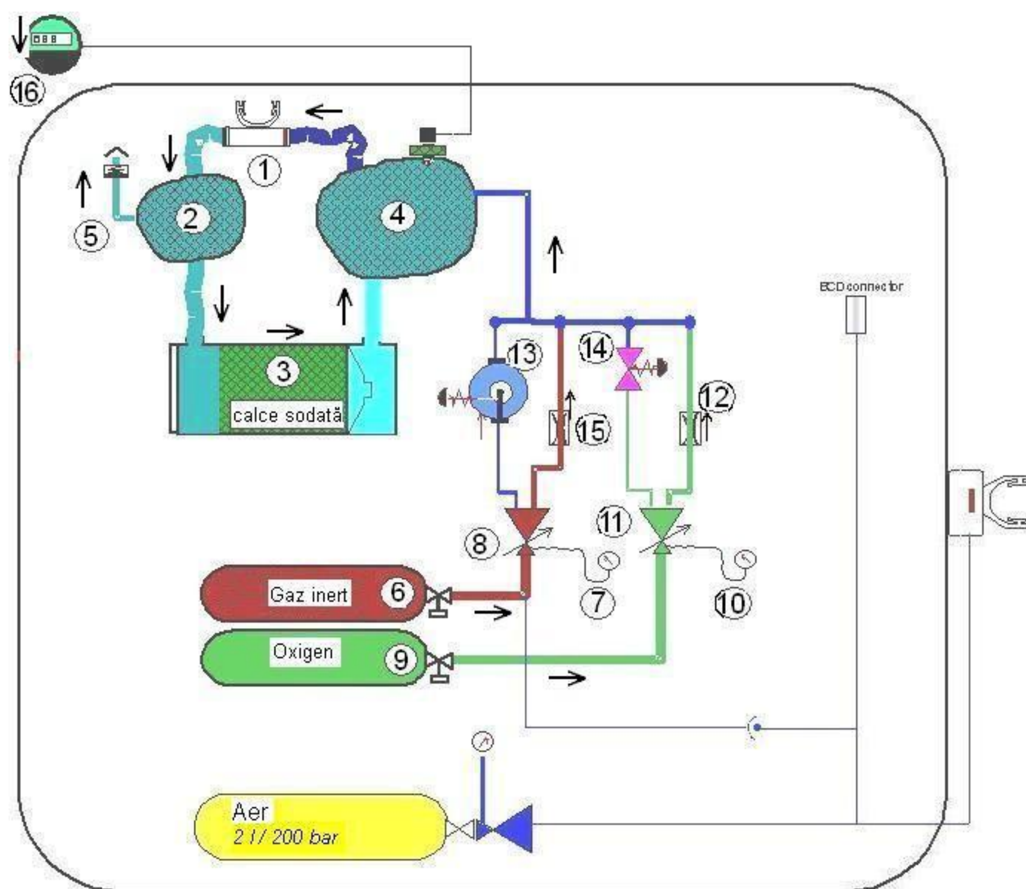


Fig. 4.12. Schema de principiu a aparatului SMT:
1- piesă bucală cu muştiuc; 2- sac de expiraţie; 3- cartuş epurator pentru CO_2; 4- sac de inspiraţie; 5- supapă de evacuare; 6- butelie gaz inert; 7- manometru butelie gaz inert; 8- reductor de presiune pe gaz inert; 9- butelie oxigen; 10- manometru butelie oxigen; 11- reductor de presiune pe oxigen; 12, 13, 14, 15- dispozitiv de injecţie, completare şi corectare; 16- indicator de oxigen.

In figura 4.12 se prezintă schema aparatului SMT. Aparatul păstrează amestecul gazos expirat şi îl pregăteşte din nou pentru inspiraţie. Scafandrul respiră prin intermediul unei piese bucale prevăzută cu muştiuc (1). Prin intermediul furtunului de expiraţie, gazul expirat de către scafandru este trimis către un sac de expiraţie (2) şi, de aici, în canistra cu material absorbant tip calce sodată (cartuşul epurator) (3). Excesul de gaz este eliminat în apă prin intermediul supapei reglabile de evacuare (5) şi a difuzorului de bule (dispozitiv care divide bulele de gaz eliminat în bule de foarte mici dimensiuni astfel încât evacuarea lor în apă nu este sesizată de la suprafaţă, asigurând secretul operaţiunii). Gazul care trece prin cartuşul epurator este curăţat de dioxidul de carbon şi apoi este trimis pe circuitul de inspiraţie în sacul de inspiraţie (4). Aici gazul proaspăt este adăugat prin intermediul dispozitivului de dozaj alcătuit din reperele (12), (13), (14) şi (15), iar gazul respirator astfel regenerat şi completat este inspirat de către scafandru prin furtunul de inspiraţie, din sacul de inspiraţie (4).

Gazele respiratorii, care prin amestecare conduc la realizarea amestecului gazos binar proaspăt, sunt stocate în buteliile (6) şi (9), prima pentru gazul inert (gazul diluant) şi a doua pentru oxigen. Buteliile sunt prevăzute cu robinete de butelie. Presiunile înalte din butelii sunt indicate la manometrele de înaltă presiune (7) şi respectiv (10).

Înainte de a fi trimise către sacul de inspiraţie (4) prin intermediul dispozitivului de dozaj, gazul inert şi oxigenul sunt trecute prin reductoarele de presiune (8) şi respectiv (11), unde are loc o reducere a presiunilor de la valoarea presiunilor din butelii la valorile presiunilor necesare în amonte de dispozitivul de dozare.

Valva direcţională a muştiucului controlează direcţia fluxului în circuit. Muştiucul poate fi etanşeizat cu ajutorul unei valve cilindrice.

Pentru monitorizarea presiunii parţiale a oxigenului, aparatul ete echipat cu un indicator de oxigen (16) care indică continuu presiunea parţială a oxigenului din sacul respirator şi cu o alarmă optică care atenţionează scafandrul asupra momentului în care presiunea parţială a oxigenului din sac este mai mare sau mai mică decât limitele superioară şi respectiv inferioară presetate ale alarmei. Aparatul a fost proiectat pentru un consum maxim de oxigen de 2,5 l_N/min. De asemenea, aparatul SMT este echipat cu un sistem de siguranţă alimentat de la o butelie cu volumul interior de 2 *l* încărcată la 200 bar (sc. man.) cu aer comprimat. Acesta constă dintr-o valvă de alimentare controlată de către sacul respirator care, în caz de urgenţă, furnizează scafandrului amestecul de gaze adaptat la ritmul de respiraţie al acestuia.

Ratele de dozaj ale gazelor folosite pentru respiraţie (gaz inert şi oxigen) sunt selectate în funcţie de adâncime. În cazul unei cereri crescute de gaz, circuitul de respiraţie este umplut printr-o valvă de trecere controlată de plămân. Dioxidul de carbon eliminat de scafandru este absorbit în cartuşul cu masă absorbantă. Datorită principiului aparatelor cu circuit semiînchis şi alimentării variabile cu gaz, conţinutul de oxigen din circuitul de respiraţie va fi practic mereu mai mic decât oxigenul conţinut în gazul proaspăt adăugat, dar între limitele cerute de tehnologie. La o scufundare, aparatul foloseşte 4 *l* de calce sodată. Presiunea de umplere a buteliilor este de 200 bar (sc. man.). Presiunea gazului din butelii scade în timpul folosirii aparatului până la cel puţin 20 bar (sc. man.). Aparatul poate fi folosit la scufundări în apă cu temperaturi cuprinse între -2^0C şi $+35^0$C.



Fig. 4.13. Scafandru militar echipat cu aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, SMT.

Întotdeauna, înainte de efectuarea unei scufundări, scafandrul trebuie să efectueze următoarele operaţiuni:

- să parcurgă întreaga listă de verificări conform ordinii şi regulilor stabilite de producător;
- să verifice ataşarea corectă a buteliilor cu gaze respiratorii. Buteliile nu trebuie umplute la o presiune mai mare decât cea prescrisă de producător. Pe timpul depozitării acestora, pentru a preveni pătrunderea umezelii, se recomandă păstrarea lor la o presiune de circa 2 bar (sc. man.);
- înainte de scufundare, se umple canistra cartuşului epurator cu masă absorbantă de tip calce sodată; după scufundare se goleşte canistra;
- nici o componentă a traiectului de înaltă şi joasă presiune nu se lubrifiază.

Întotdeauna se va evita pătrunderea apei în interiorul aparatului. La suprafaţă, aparatul trebuie protejat de acţiunea directă a razelor solare.

4.2.2.2. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, M100M

Aparatul de respirat sub apă, autonom, cu circuit semiînchis, M100M (fig. 4.14), fabricat de firma DRÄGER, este un aparat ce utilizează amestecuri respiratorii heliu-oxigen (HELIOX), preparate local, din cele două componente stocate în butelii separate.

Dozajul componentelor gazoase din amestecul binar, este efectuat în mod automat şi este determinat de adâncimea de imersie.

Aparatul funcţionează în circuit semiînchis, cu cartuş epurator pentru purificarea amestecului respirator prin reţinerea dioxidului de carbon.

Aparatul este echipat cu o unitate de afişaj amplasată la masca scafandrului, ce indică dacă valoarea presiunii parţiale a oxigenului din amestecul inspirat este menţinută între valorile minimă şi maximă admise.

Aparatul M 100 M este conceput pentru utilizare la adâncimi cuprinse între 0 m şi 90 m, în special în misiuni militare, unde este necesară o amprentă magnetică şi acustică scăzută conform cu normele NATO.



Fig. 4.14. Aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, M 100 M.

Configuraţia aparatului permite efectuarea de modificări care să conducă la realizarea de amestecuri binare azot-oxigen (NITROX).

În continuare sunt prezentate principalele date tehnice ale aparatului M 100 M:

- Principiul funcţionării: aparat cu circuit semiînchis;
- Adâncimea scufundării: 0...90 m;
- Gazele respiratorii: oxigen cu puritate de 99,5% şi heliu;
- Calcea sodată: DiveSorb, 3,5 *l* pentru o scufundare;
- Dimensiunile aparatului: 660 mm lăţime; 465 mm înălţime şi 225 mm grosime;
- Greutatea aparatului: 35 kgf pe uscat şi neutră în apă;
- Temperatura de operare: 1...35^{0}C;
- Temperatura de depozitare: -30...70^{0}C fără senzor de O_2 şi -20...40^{0}C cu senzor de O_2;
- Unitatea de diagnosticare a presiunii parţiale a oxigenului:
  - alarmă pentru limita inferioară: $p_{O_2} \leq 0{,}4$ bar (sc.abs.);
  - alarmă pentru limita superioară: $p_{O_2} \geq 1{,}8$ bar (sc.abs.);
- Alimentarea electrică: 4 baterii de 1,5 V;
- Durata bateriei: aprox. 100 ore.
- Timpul maxim de stocare: 3 luni la 25^0 C;
- Timpul maxim de operare a senzorului de O_2: 6 luni;
- Caracteristicile buteliilor de oxigen şi de heliu:
  - volum interior: 3 *l*;
  - diametru: 117 mm;

presiunea de operare :300 bar (sc. man.) sau 200 bar (sc. man.);

4.2.2.3. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, SM1

Aparatul SMS1 (fig. 4.15) este un aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis pentru aplicaţii militare produs de firma Dräger. Este urmat după un timp

de o variantă mai perfecţionată, aparatul M100M. Prezintă amprentă magnetică scăzută.

Aparatul funcţionează cu debit masic constant, cu preparare locală a amestecului din cele două butelii cu oxigen şi aer ca diluant cu care este prevăzut. Oxigenul este furnizat la un debit de 2 *l*/min, iar aerul la 2,2 *l*/min.

Oxigenul este injectat prin intermediul unui detentor treapta I la o presiune fixă de 9 bar, la un debit constant de 2 l/min independent de adâncime.

Aerul este injectat printr-un detentor treapta I şi un detentor treapta a II-a ce scade presiunea la o valoare cu 0,5 bar peste presiunea ambiantă.

Amestecul este realizat într-un recipient special de amestec înainte de a intra în circuit. În sistem mai sunt incluse între cele două detentoare, două supape de securitate cu rolul de a avertiza scafandrul când debitul de gaz scade sau se opreşte. Este inclus şi un robinet manual de by-pass.

Date tehnice:

- Adâncime maximă: 40 m;
- Capacitate butelii: 2 x 1,5 *l* la 200 bar;
- Dimensiuni: 640 x 420 x 270 mm;
- Capacitate canistră: 2,1 kg; durată: 100 min la 10 m adâncime;
- Greutate : 25 kg pe uscat, 4 kg în apă.



Fig. 4.15. Aparatul cu circuit semi-închis, cu amestec preparat local, SM1.

4.2.2.4. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, FGT III

Aparatul FGT III (fig. 4.16) este un aparat recirculator militar în circuit semiînchis cu debit masic constant, produs de firma Dräger. Aparatul precede celorlalte aparate din seria FGT (FGT, I şi FGT II) şi este conceput a fi utilizat pentru ieşiri din submarin sau din turelă.

Specificaţii tehnice:

- Dimensiuni: 680 x 456 x 215 mm;
- Greutate: 28 kg pe uscat, flotabilitate neutră în apă;
- Capacitate butelii: 4 *l* la 200 bar;
- Capacitate canistră: 3 kg Soda Lime.



Fig. 4.16. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, FGT III.

4.3. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT MIXT. GENERALITĂŢI

Aparatele de respirat sub apă cu circuit mixt, sunt aparatele care funcţionează, de regulă, în circuit închis cu oxigen până la adâncimea de 6,5…7 m (şi chiar la adâncimea de 15…20 m pentru incursiuni de scurtă durată) şi în circuit deschis, închis sau semiînchis cu amestec respirator gazos, peste aceste adâncimi, fără a depăşi, în general, adâncimea de 54 m. Aceste aparate au în componenţă elementele caracteristice ale aparatelor cu circuit închis, deschis sau semiînchis, combinând totodată avantajele acestor aparate.

4.4. TIPURI DE APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT MIXT

Aparatele de respirat sub apă cu circuit mixt sunt acele aparate care funcţionează, pe măsură ce scafandrul pătrunde în apă, în cel puţin două moduri:

- iniţial în circuit închis, iar apoi în circuit deschis de respiraţie;
- iniţial în circuit închis, iar apoi în circuit semiînchis de respiraţie.

Cea mai reuşită combinaţie, în special pentru aplicaţiile militare, este funcţionarea iniţială în circuit închis cu oxigen până la adâncimea de 6,5…7 m şi în circuit semiînchis cu amestec NITROX supraoxigenat, la adâncimi mai mari. Aceste aparate oferă o autonomie mare, adâncimi de lucru relativ mari, timpi de decompresie scăzuţi şi o bună siguranţă în funcţionare.

Aceste aparate de respirat sub apă, cu circuit mixt, comportă niveluri ridicate de risc în raport cu diferite tipuri de accidente (hipoxie, hiperoxie, intoxicaţie cu CO_2), cumulând nivelurile ridicate de risc, specifice aparatelor de respirat sub apă cu circuit închis şi semiînchis. Din acest motiv, cei care desfăşoară activităţi cu caracter civil nu pot utiliza aparate de respirat sub apă cu oxigen sau cu amestecuri supraoxigenate, aşa cum sunt aparatele de respirat sub apă cu circuit mixt, acestea fiind destinate numai scafandrilor militari, adică scafandrilor de luptă şi respectiv, scafandrilor deminori, selecţionaţi în urma unor teste speciale aşa cum este *testul oxigenului* şi beneficiind de antrenamente specifice riguroase.

4.4.1. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, IDA-71U

Aparatul cu circuit mixt IDA-71U (fig. 4.17) se compune din două butelii de 1 ℓ la 200 bar (sc. man.), una pentru oxigen (8) şi una pentru amestec azot-oxigen (NITROX) (10) cu concentraţia maximă a oxigenului din amestec de 40% (r_{O_2} = 0,4).

Fiecare din cele două butelii este dotată cu câte un manometru pentru controlul presiunii (7) şi respectiv (11) şi cu câte un detentor treapta I (6) şi respectiv (12) care reduce presiunea de la nivelul presiunii din butelie la o presiune de 8...10 bar (sc. man.) peste presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii de imersie.

Aparatul mai are în componenţă un sac respirator (3) dotat cu un detentor treapta a II-a (4) şi o supapă de siguranţă (1), ambele pilotate de presiunea hidrostatică.

Scafandrul respiră din sacul respirator prin intermediul unei piese bucale (muştiuc) (2) prevăzută cu supape unisens de inspiraţie şi expiraţie, sau prin intremediul unei măşti faciale prevăzută cu o piesă de respiraţie oro-nazală.

Inspiraţia se face direct din sac, iar expiraţia se face către cele două cartuşe epuratoare (13) cu calce sodată destinate reţinerii dioxidului de carbon. Alimentarea sacului respirator se face din cele două butelii prin intermediul unui racord rapid (cuplă rapidă) (5) şi a unui distribuitor de gaze (9).

Distribuitorul de gaze (fig. 4.18) se compune din două mecanisme de spălare a sacului respirator, unul cu oxigen (1) şi unul cu amestec NITROX (2), dotate fiecare cu duze compensatoare (3) şi duze de debit (4), dintr-un mecanism de alimentare a distribuitorului cu amestec NITROX (5) comandat de presiunea hidrostatică corespunzătoare unei anumite adâncimi, dintr-un mecanism de descărcare a circuitului de amestec NITROX (6) la revenirea de la adâncimea de lucru la adâncimea de 10...15 m, în drum către suprafaţa apei, dintr-un mecanism de alimentare cu oxigen pentru spălarea sacului (7) la revenirea la adâncimea de 10...15 m şi din mai mulţi clapeţi antiretur (8).

În continuare, se prezintă modul de funcţionare a aparatului IDA-71U în cele trei variante posibile de reglare a presiunii la ieşirea din detentoarele treapta I montate pe cele două butelii.

a) Cazul $p_{\text{NITROX}} = 8$ bar (sc. man.) şi $p_{O_2} = 6$ bar (sc. man.)

În cazul în care presiunea la ieşirea din detentorul treapta I de pe butelia cu NITROX este mai mare decât presiunea la ieşirea din detentorul treapta I de pe butelia cu oxigen, aparatul funcţionează astfel:

Se deschid robinetele buteliilor de oxigen şi NITROX indiferent de ordinea de deschidere. În momentul în care se se deschide butelia de NITROX, este alimentat mecanismul distribuitorului (5 din figura 4.18). Aparatul fiind la suprafaţă, clapetul mecanismului este închis, sistemul rămânând în aşteptare. În momentul în care se deschide butelia de oxigen, presiunea învinge rezistenţa resortului mecanismului de alimentare cu oxigen (7 din figura 4.18) a distribuitorului şi prin (1 din figura 4.18) spală sacul respirator cu oxigen până când duza compensatoare (3 din figura 4.18) echilibrează presiunile pe suprafaţa membranei mecanismului oprind scurgerea oxigenului din butelie. În această fază se pierde o cantitate de oxigen din butelie echivalentă cu o diferenţă de presiune de 15...25 bar. În acelaşi timp, oxigenul alimentează şi detentorul treapta a II-a din sacul respirator (4 din figura 4.17). În acest moment, aparatul este gata pentru pătrunderea sub apă.

Din acest aparat se poate respira oxigen pur în circuit închis, iar surplusul necesar este compensat la cerere prin detentorul treapta a II-a (4 din figura 4.17). Această situaţie se păstrează până la o adâncime de 15 m sau mai puţin, funcţie de reglajul sistemului de distribuire a amestecului NITROX şi de tehnologia de scufundare. Îndată ce s-a depăşit această adâncime, intră în funcţiune mecanismul de alimentare cu NITROX (5 figura 4.18) care blochează alimentarea cu oxigen şi spală, prin intermediul mecanismului (2 din figura 4.18), sacul respirator cu amestec NITROX în aşa fel încât în sac să rezulte un amestec azot-oxigen cu o concentraţie a oxigenului aproximativ egală cu 40%. Pe perioada spălării, presiunea gazului din butelia cu NITROX scade cu 50 bar, ceea ce corespunde unui volum suficient de mare pentru spălarea corespunzătoare a sacului respirator. Din acest moment, în sac se află un amestec NITROX, iar detentorul treapta a II-a (4 din figura 4.17) este alimentat tot cu amestec NITROX. La revenirea la suprafaţă, se produce fenomenul invers şi anume, în jurul adâncimii de 12 m se blochează alimentarea aparatului cu amestec NITROX şi se execută spălarea sacului respirator cu oxigen pur. Pe timpul spălării cu oxigen pur, se pierde un volum ce corespunde unei diferenţe de presiune în butelia cu oxigen de aproximativ 25 bar, volum suficient pentru a aduce amestecul din sacul respirator la un amestec cu o concentraţie a oxigenului de peste 95%.

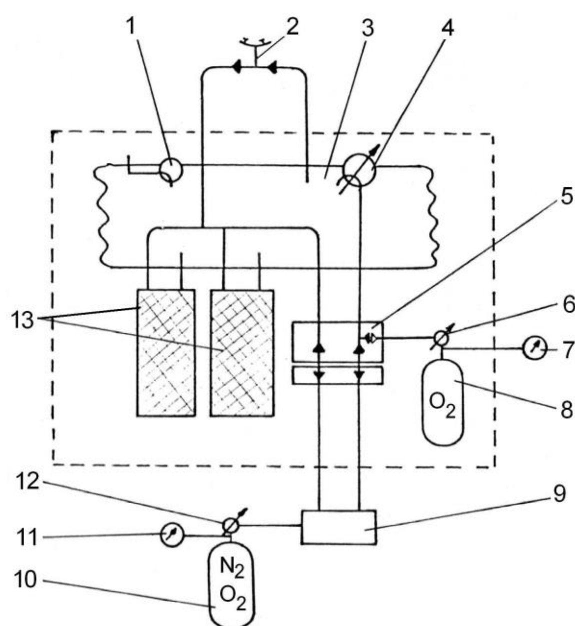


Fig. 4.17. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt, IDA-71U.

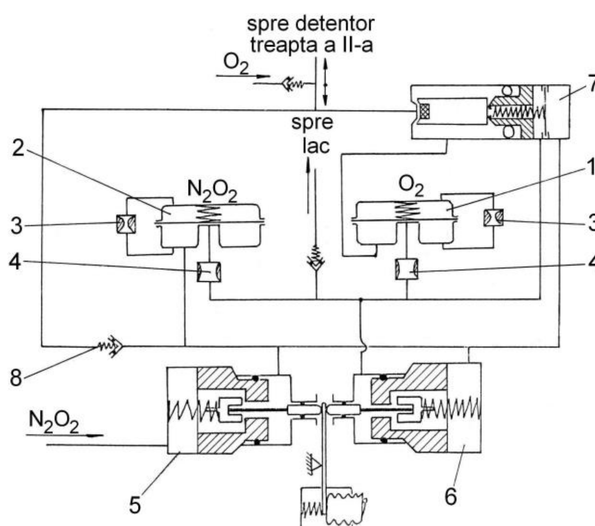


Fig. 4.18. Distribuitorul de gaze al aparatului IDA-71U.

b) Cazul $p_{\text{NITROX}} = 8$ bar (sc. man.) şi $p_{O_2} = 8$ bar (sc. man.)

În cazul în care presiunea la ieşirea din detentorul treapta I de pe butelia cu NITROX este egală cu presiunea la ieşirea din detentorul treapa I de pe butelia cu oxigen, aparatul funcţionează similar cu principiul de la punctul **a)**, deosebirea constând în faptul că pe linia de alimentare a detentorului treapta a II-a (4 din figura 4.17) a sacului respirator există atât oxigen cât şi NITROX.

c) Cazul $p_{\text{NITROX}} = 6$ bar (sc. man.) şi $p_{O_2} = 8$ bar (sc. man.)

În cazul în care presiunea la ieşirea din detentorul treapta I de pe butelia cu NITROX este mai mică decât pesiunea la ieşirea din detentorul treapta I de pe butelia cu oxigen, aparatul funcţionează în principiu, la fel ca în cazul de la punctul **a)**, cu precizările următoare: calea de spălare cu oxigen a sacului respirator nu se blochează, iar pe linia comună spre detentorul treapta a II-a va fi numai oxigen, calea cu NITROX fiind blocată la clapetul antiretur (8 din figura 4.18).

Aparatul de respirat sub apă IDA-71U a intrat în dotarea submariniştilor din Forţele Navale Române, fiind utilizatat ca aparat de salvare de pe submarin, datorită faptului că acest aparat a fost conceput să lucreze fără a fi necesare paliere de decompresie, ci numai respectarea unei anumite viteze de ridicare.

4.4.2. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, OXYMIX 97

Aparatul de respirat sub apă OXYMIX 97 (fig. 4.19), ca orice aparat cu circuit mixt, poate lucra în cele două moduri specifice funcţie de adâncime: până la adâncimi de 7 m cu oxigen în circuit închis şi până la adâncimea de 25 m cu amestec binar NITROX cu o concentraţie de oxigen de 60%, sau până la adâncimea de 30 m cu amestec binar NITROX cu o concentraţie de oxigen de 50% în circuit semiînchis. Trecerea de la un mod de funcţionare la altul se realizează prin simpla manevrare a unui comutator.

Aparatul, pe circuitul care asigură funcţionarea în regim închis, la adâncimi de până la 7 m, este echipat cu o butelie cu oxigen cu capacitatea de 1,5 *l* la 200 bar (sc. man.), care îi conferă o autonomie de 180 min. sau cu o butelie cu capacitatea de 2 *l* la 200 bar (sc. man.) care îi conferă o autonomie de 240 min. Aparatul, pe circuitul care asigură funcţionarea în regim semiînchis la adâncimi de până la 25 m, este echipat cu o butelie cu amestec respirator NITROX cu capacitatea de 2 *l* la 200 bar (sc. man.), care îi conferă o autonomie de minimum 45 minute pentru scufundări la 25 m. Aparatul OXYMIX 97 poate să îşi mărească autonomia. Astfel, în cazul în care scafandrul efectuează scufundări ieşind dintr-o turelă presurizată sau din barocamera unui submersibil purtător de scafandri, aparatul OXYMIX 97 poate fi conectat la o rezervă mai mare de amestec respirator.

Aparatul, atât din punct de vedere al amprentei magnetice cât şi al amprentei acustice, corespunde standardelor NATO. Greutatea în aer este de 22,45 kgf, iar capacitatea canistrei cu calce sodată este de 2 kg pentru o autonomie de 4 ore.

Aparatul este format din două unităţi:

- o unitate plasată pe pieptul scafandrului, compusă din aparatul de respirat propriu-zis şi butelia de oxigen de 1,5 *l* sau 2 *l*;
- o unitate plasată pe picior, compusă din butelia de 2 *l* cu amestec, NITROX.

Sistemul de respirat conţine doi saci respiratori, unul în altul, care operează împreună. Comutatorul de gaze dă posibilitatea conectării gazului şi modului de lucru conform adâncimii corespunzătoare planului de scufundare adoptat.

Intrarea apei în circuitul de respirat compromite scufundarea prin compromiterea masei absorbante alcătuită din calce sodată, iar intrarea aerului în circuit impune reluarea operaţiunii de spălare a sacului respirator.



Fig. 4.19. Aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt, OXYMIX 97.

4.4.3. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, LAR VII COMBI

Aparatul de scufundare LAR VII Combi (fig. 4.20), este un aparat de respirat sub apă cu circuit mixt care poate funcţiona în sistem închis cu oxigen şi în sistem semiînchis cu amestec de gaze prefabricat de tip NATO, NITROX B (60% O_2, 40% N_2).



Fig. 4.20. Scafandru militar echipat cu aparat de respirat sub apă cu circuit mixt, LAR VII Combi.

Pe timpul funcţionării este posibilă comutarea între regimul de funcţionare cu oxigen în circuit închis şi regimul de funcţionare cu amestec binar NITROX în circuit semiînchis. Comutarea de la funcţionarea cu oxigen la funcţionarea cu NITROX (în etapa coborârii în apă) şi de la funcţionarea cu NITROX la funcţionarea cu oxigen (în etapa urcării către suprafaţă), are loc în timpul scufundării, la adâncimea de comutare prestabilită.

4.4.4. APARATELE CU CIRCUIT MIXT, SIVA 24, SIVA 55 ŞI SIVA +

Aparatele autonome de respirat sub apă cu circuit mixt lucrând atât cu oxigen în circuit închis, cât şi cu amestec respirator prefabricat în circuit semiînchis, din seria SIVA, sunt aparate utilizate în scopuri militare, fiind fabricate de firma canadiană CARLETON LIFE SUPPORT TECH. Ltd. Trecerea de la modul de funcţionare cu oxigen în circuit închis la modul de funcţionare cu amestec în circuit semiînchis şi invers, se efectuează chiar în timpul scufundării, la adâncimea propusă de tehnologie.

I. Aparatul de respirat sub apă SIVA 24 (fig. 4.21), este un aparat utilizat în operaţiuni militare şi are următoarele caracteristici generale:

- este un aparat cu circuit mixt amplasat pe pieptul scafandrului;
- lucrează în circuit semiînchis cu amestec până la adâncimea de 24 m;
- lucrează în circuit închis cu oxigen până la adâncimea de 8 m;
- durata calcei sodate din cartuşul epurator pentru reţinerea CO_2 este de 4 ore.

II. Aparatul de respirat sub apă SIVA 55 este un aparat utilizat de către scafandri militari pentru operaţiuni clandestine şi are următoarele caracteristici generale:

- este un aparat cu circuit mixt;
- lucrează în circuit semiînchis cu amestec până la adâncimea de 55 m;
- lucrează în circuit închis cu oxigen până la adâncimea de 8 m;
- durata calcei sodate din cartuşul epurator pentru CO_2 este de 4 ore.

III. Aparatul de respirat sub apă SIVA + este un aparat folosit de către scafandri deminori şi are următoarele caracteristici generale:

- este un aparat cu circuit mixt;
- lucrează în circuit semiînchis cu amestec până la adâncimea de 95 m;
- lucrează în circuit închis, cu oxigen până la adâncimea de 8 m;
- durata calcei sodate din cartuşul epurator pentru CO_2 este de 4 ore.



Fig. 4.21. Aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt SIVA 24.

4.4.5. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, MIXGERS 78

Aparatul Mixgers 78 (fig. 4.22)este un aparat pentru aplicaţii militare ce funcţionează în circuit mixt, produs de firma AQUALUNG / SPIROTECHNIQUE şi folosit de scafandrii militari din grupurile de comando ale Marinei Naţionale franceze. Ulterior, apare o variantă mai perfecţionată, Mixgers 97.

Aparatul poate funcţiona cu oxigen în circuit închis şi cu amestec NITROX în circuit semiînchis, circuite ce pot fi schimbate de scafandru în timpul scufundării.

Avantajul circuitului mixt este acela că oferă scafandrului discreţie în circuit închis, combinată cu adâncime mai mare şi durată mai îndelungată a scufundării, în circuit semiînchis.

Câteva date tehnice:

- Adâncime maximă: Oxigen – 7 m;
  Nitrox – 25…30 m;
- Capacitate canistră: 2 kg Soda Lime suficient pentru 4 ore de scufundare;
- Capacitate butelii: 1,5 *l* Oxigen/2 *l* NITROX, ambele la 200 bar.



Fig. 4.22. Aparatul cu circuit mixt, Mixgers 78.

4.4.6. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, FGT II

FGT II (denumit şi Leba 54) (fig. 4.23) este un aparat cu circuit mixt produs de Dräger în anul 1997 special pentru oparaţiuni militare, precum şi pentru diferite lucrări profesionale de scufundare ca ranfluare, reparaţii, căutări, alte lucrări subacvatice. Are amprentă magnetică conform Stanag 2897-A.

Aparatul funcţionează în circuit închis cu oxigen până la adâncimea de 10 m şi în circuit semiînchis cu amestec NITROX cu debit masic constant până la adâncimea de 54 m.

Aparatul FGT II este predecesorul aparatului Atlantis fiind varianta militară a acestuia.

Date tehnice:

- Adâncime maximă: 10 m în circuit închis cu oxigen;
  24 m cu NITROX B, în circuit semiînchis;
  42 m cu NITROX C, în circuit semiînchis;
  54 m cu Nitrox D, în circuit semiînchis;
- Capacitate canistră: 2,7 kg Drägersorb cu durata de 3 ore;
- Capacitate sac respirator: 2 x 4 *l*;
- Capacitate butelii din oţel: 5 *l* la 200 bar;
- Greutate: 15,6 kg;
- Dimensiuni: 520 x 370 x 240 mm.



Fig. 4.23. Aparatul cu circuit mixt, FGT II.

4.4.7. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, INFINITO

Aparatul Infinito este un aparat cu circuit mixt produs de firma Powerbreathe S.P.A. din Italia, special conceput atât pentru scufundări cu caracter militar cât şi pentru scufundări civile sau diferite lucrări profesionale.

Aparatul Infinito a fost produs în mai multe variante: IAMT 444 SC/O2 (fig. 4.24) în circuit mixt (semiînchis cu amestec şi închis cu oxigen), IAMT 444 FC şi IAMT 888 în circuit închis cu preparare locală a amestecului.

Aparatul IAMT 444 SC/O2 este prevăzut cu un sistem de monitorizare ce indică scafandrului adâncimea, p_{O2} medie, p_{O2} pentru fiecare din cei trei senzori, temperatura gazului din sacul respirator, nivelul de încărcare al bateriei, palierul şi durata decompresiei, presiunea din buteliile cu oxigen şi diluant, consumul absorbantului, viteaza de coborâre şi urcare, semnale luminoase de avertizare,

Alte date tehnice:

- Capacitate canistră: 1,75 sau 2,5 kg;
- Capacitate sac respirator: 6…8 *l*;
- Greutate: 15…18 kg;
- Dimensiuni:550 x 330 x 195 mm.



Fig. 4.24. Aparatul cu circuit mixt, Infinito IAMT 444 SC/O2.

4.4.8. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, DIVEX SHADOW EXCURSION

Aparatul Shadow Excursion (fig. 4.25) este varianta cu circuit mixt produsă de firma Divex din Marea Britanie.

Aparatul funcţionează în circuit închis cu oxigen şi în circuit semiînchis cu amestec NITROX fiind utilizat în prezent de scafandrii militari din mai multe forţe navale într-o gamă largă de aplicaţii militare cum ar fi deminări, operaţiuni clandestine, cu plecare atât de pe uscat cât şi de pe submarine.

În circuit închis, oxigenul este furnizat prin supapa de debit la cerere prevăzută şi cu un robinet de by-pass permiţând o durată a scufundării de 3 ore la un consum de oxigen de 1,78 *l*/min.

În circuit semiînchis, amestecul NITROX (60%O_2 /40%N_2) este furnizat la debit masic constant cu o durată a scufundării de 1 oră la un debit masic constant de 6 *l*/min.

Capacitatea canistrei cu absorbant este de 3,5 kg, iar capacitatea buteliilor cu oxigen şi NITROX este de 2 *l* la 200 bar fiecare.



Fig. 4.25. Scafandru militar echipat cu aparatul cu circuit mixt, Divex Shadow Excursion.

4.4.9. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, VIPER +

Aparatul recirculator Viper + (fig. 4.26) este un aparat în circuit mixt produs de firma canadiană Cobham, special conceput pentru operaţiuni de deminare, şi se află în dotarea forţelor navale din 10 ţări.

Aparatul funcţionează în circuit închis cu oxigen şi în circuit semiînchis cu amestec dozat la debit volumic constant, presiunea parţială a oxigenului fiind monitorizată manual.

În modul de funcţionare în circuit închis, aparatul este prevăzut cu posibilitatea efectuării decompresiei în apă cu oxigen, precum şi folosirea tabelelor de scufundare canadiene DCIEM.

Aparatul Viper + poate fi convertit în circuit închis cu amestec.

Date tehnice:

- Adâncime maximă: 8 m în circuit închis cu oxigen;
  95 m în circuit semiînchis cu amestec;
- Capacitate canistră: 4 ore;
- Capacitate butelii: 680 *l* la 242 bar fiecare;
- Dimensiuni: 725 x 500 x 240 mm;
- Greutate: 29 kg pe uscat, flotabilitate neutră în apă de mare.



Fig. 4.26. Aparatul recirculator în circuit mixt, Viper +.

4.4.10. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, VIPER SC

Aparatul recirculator Viper SC (fig. 4.27) este un aparat în circuit mixt produs de firma canadiană Cobham special conceput pentru operaţiuni militare de deminare, aflându-se în dotarea forţelor navale din 14 ţări. Are o amprentă magnetică scăzută conform standardelor NATO.

Aparatul funcţionează în circuit închis cu oxigen şi în circuit semiînchis cu amestec NITROX cu debit masic constant, cu posibilitatea de a fi convertit să funcţioneze şi în circuit închis cu amestec NITROX.

Date tehnice:

- Adâncime maximă: în circuit închis cu oxigen: 8 m;
  în circuit semiînchis cu amestec: 55 m;
  în circuit închis cu amestec: 100 m;
- Capacitate canistră: 4 ore;
- Butelii oxigen şi NITROX: 1,3 *l* la 242 bar fiecare;
- Dimensiuni: 510 x 480 x 240 mm;
- Greutate: 23 kg pe uscat, flotabilitate neutră în apă.

La acest aparat se pot folosi mai multe tipuri de măşti faciale.



Fig. 4.27. Aparatul recirculator cu circuit mixt, Viper SC.

5.

CALCULUL GAZODINAMIC AL APARATELOR SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ

În acest capitol sunt prezentate calcule specifice mecanicii fluidelor compresibile utile la proiectarea circuitelor gazodinamice ale aparatelor speciale de respirat sub apă.

Schemele de principiu care au stat la baza proiectării unor aparate speciale de respirat sub apă cu circuit închis, semiînchis sau mixt, sunt prezentate în figurile 5.1 (aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt) şi 5.2 (aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis). Schemele comportă trei blocuri distincte: blocul de alimentare cu amestec respirator, blocul de alimentare cu oxigen şi blocul cu sacul respirator. Primele două blocuri au în componenţă unul, două sau trei ajutaje: de injecţie AI, de compensare AC şi de spălare a sacului respirator AS. În continuare, sunt prezentate elementele de mecanica fluidelor compresibile specifice calculelor de gazodinamică a circuitelor aparatelor de respirat sub apă speciale şi relaţiile de calcul aferente elementelor fiecărui bloc din componenţa acestor aparate.

5.1. CURGEREA GAZELOR RESPIRATORII PRIN AJUTAJELE DE INJECŢIE, DE COMPENSARE ŞI DE SPĂLARE

În paragrafele următoare sunt prezentate elemente de teoria ajutajelor. Curgerile prin ajutaje sunt considerate ca adiabatice reversibile (izentropice).

5.1.1. CURGEREA IZENTROPICĂ PRIN AJUTAJE. RELAŢIA LUI HUGONIOT

Pentru ajutajele propuse ca elemente care să realizeze injecţia, compensarea şi spălarea, se pot face următoarele ipoteze de calcul: curgerea este adiabatică $\Delta Q = 0$, fără frecare $\Delta W_f = 0$, precum şi fără lucru mecanic util $\Delta W_M = 0$.

Ţinând cont de ipotezele de mai sus şi apelând la ecuaţia de bilanţ energetic scrisă pentru unitatea de masă, deci cu mărimi specifice, sub forma:

$$\Delta\left(H + \frac{v^2}{2} + gz\right) = -\Delta\left|W_f\right| + \Delta W_M + \Delta Q = 0\,, \qquad (5\text{-}1)$$

se poate scrie ecuaţia diferenţială:

$$\mathrm{d}\left(H + \frac{v^2}{2} + gz\right) = \mathrm{d}H + \mathrm{d}\left(\frac{v^2}{2}\right) + \mathrm{d}(gz) = 0\,, \qquad (5\text{-}2)$$

unde: $H = E + p/\rho$ este entalpia, E energia internă, p presiunea absolută, ρ densitatea gazului, $v^2/2$ energia cinetică, gz energia potenţială, W_f lucrul mecanic datorat forţelor de frecare, iar W_M lucrul mecanic util.

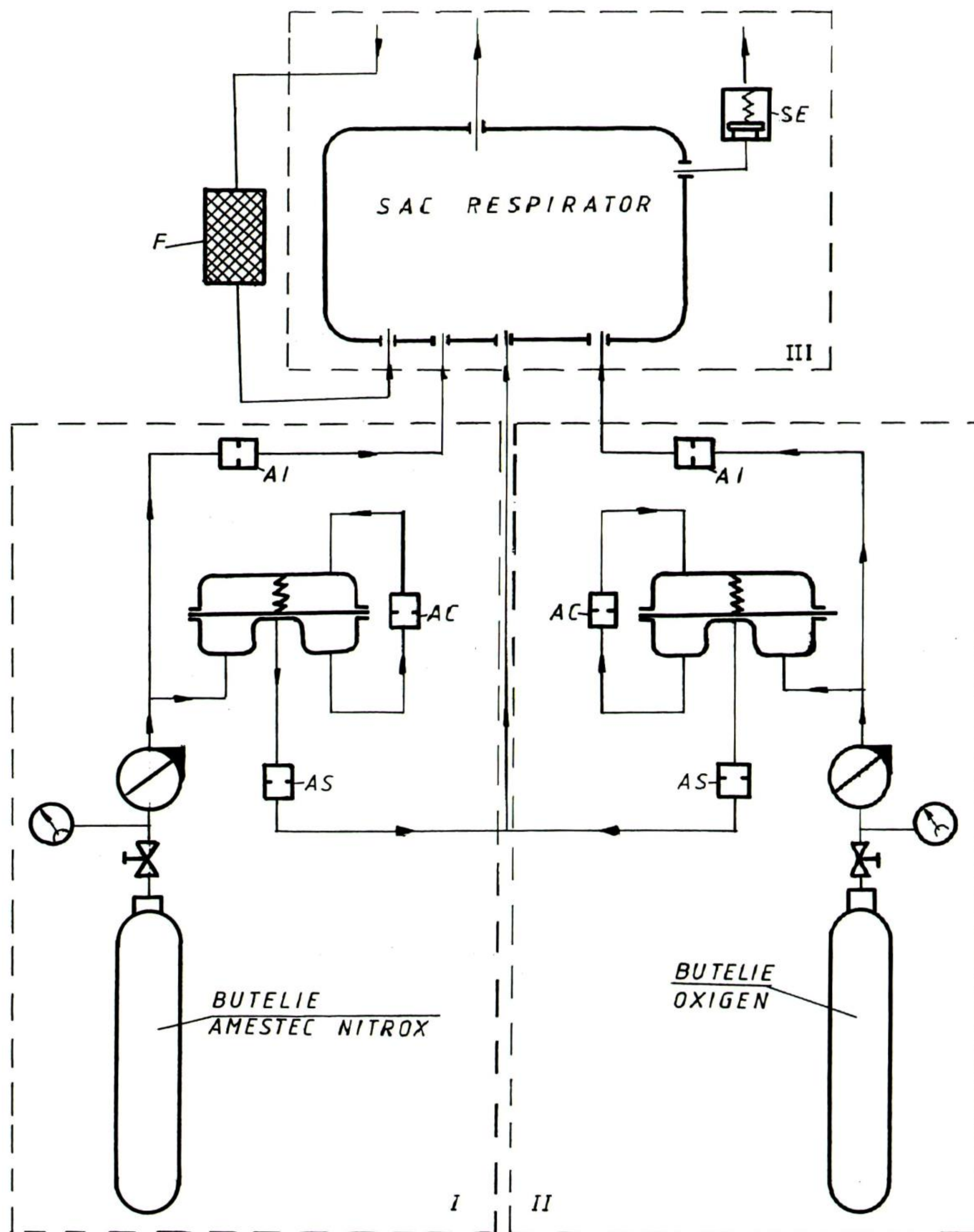


Fig. 5.1. Schema de principiu, simplificată, a aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt: I – bloc de alimentare cu amestec respirator NITROX; II – bloc de alimentare cu oxigen; III – bloc cu sac respirator; SE – supapă de evacuare; AI – ajutaj de injecţie; AC – ajutaj de compensare; AS – ajutaj de spălare a sacului respirator.

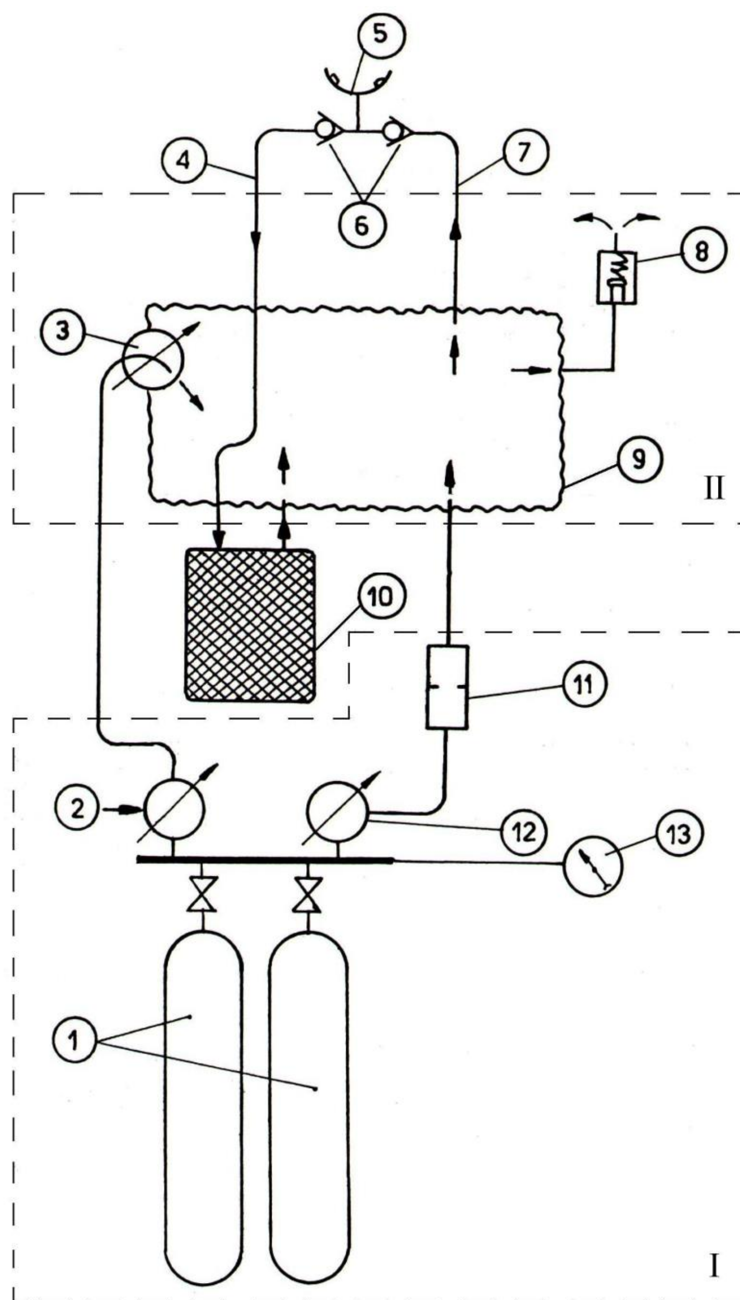


Fig. 5.2. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis: I – bloc de alimentare cu amestec respirator; II – bloc cu sac respirator; 1 – butelii stocare amestec respirator; 2 – reductor de presiune treapta întâi pilotat; 3 – reductor de presiune treapta a doua; 4 – furtun expiraţie; 5 – muştiuc; 6 – bloc supape; 7 – furtun inspiraţie; 8 – supapă evacuare; 9 – sac respirator; 10 – epurator de dioxid de carbon; 11 – ajutaj de injecţie; 12 – reductor de presiune treapta întâi nepilotat; 13 – manometru control presiune.

Termenii ecuaţiilor de mai sus sunt, din punct de vedere dimensional, viteze la pătrat $\left[L^2 T^{-2}\right]$, iar din punct de vedere energetic, energii specifice raportate la masa de fluid. Pentru studierea curgerii prin ajutaj, pe lângă ecuaţia 5-2 sunt necesare ecuaţii suplimentare şi anume:

– ecuaţia termică de stare a gazelor perfecte (ecuaţia Clapeyron – Mendeleev):

$$\frac{p}{\rho} = R\,T\,, \tag{5-3}$$

unde: ρ este densitatea gazului, iar R constanta gazului;

– ecuaţia de continuitate pentru fluide compresibile ($Av = ct.$), care poate fi scrisă sub forma diferenţială:

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho} + \frac{\mathrm{d}v}{v} + \frac{\mathrm{d}A}{A} = 0\,, \tag{5-4}$$

unde: A este aria secţiunii transversale corespunzătoare tubului de curent;

– ecuaţia energiei pentru fluidul perfect (legea lui Bernoulli) a cărei formă diferenţială este:

$$\mathrm{d}(gz) + \mathrm{d}\left(\frac{v^2}{2}\right) + \frac{\mathrm{d}p}{\rho} = 0\,. \tag{5-5}$$

Ţinând cont de ecuaţiile 5-2 şi 5-5 se poate scrie expresia variaţiei de entalpie în condiţiile ipotezelor de calcul adoptate:

$$\mathrm{d}H = \frac{\mathrm{d}p}{\rho}\,. \tag{5-6}$$

Pentru gazul perfect se poate scrie:

$$H = c_p T = \frac{k}{k-1}\,\frac{p}{\rho}\,, \tag{5-7}$$

unde $k = c_p / c_v$ este exponentul adiabatic, iar c_p şi c_v sunt căldurile specifice la presiune constantă şi respectiv la volum constant, pentru gazul de lucru.

Rezultă relaţia:

$$\mathrm{d}H = \frac{k}{k-1}\,\mathrm{d}\left(\frac{p}{\rho}\right) = \frac{k}{k-1}\left(\frac{\mathrm{d}p}{\rho} - p\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho^2}\right), \tag{5-8}$$

de unde:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\rho} = \frac{k}{k-1}\,\frac{\mathrm{d}p}{\rho} - \frac{k}{k-1}\,p\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho^2}\,. \tag{5-9}$$

Integrând ecuaţia 5-9 se regăseşte ecuaţia transformării adiabatice:

$$\frac{p}{\rho k} = ct. \tag{5-10}$$

După cum se cunoaşte, o transformare adiabatică reversibilă este în acelaşi timp şi izentropică.

Pentru a pune în evidenţă relaţiile diferenţiale între presiune *p*, viteză *v* şi aria secţiunii *A*, se porneşte de la ecuaţia 5-5 în care se neglijează termenul corespunzător forţelor masice (de greutate, $\mathrm{d}(g\,z)=0$) rezultând:

$$\mathrm{d}\left(\frac{v^2}{2}\right)+\frac{\mathrm{d}p}{\rho}=0.$$

Viteza sunetului (celeritatea) pentru procesele izentropice este:

$$a=\sqrt{\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\rho}}\quad \text{şi, deci,}\quad \mathrm{d}p=a^2\,\mathrm{d}\rho \tag{5-11}$$

de unde rezultă relaţia:

$$v\,\mathrm{d}v=-\frac{\mathrm{d}p}{\rho}=-a^2\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho}. \tag{5-12}$$

Eliminând $\mathrm{d}\rho/\rho$ din ecuaţiile 5-4 şi 5-12 rezultă relaţia diferenţială între *A* şi v, care poartă denumirea de *relaţia lui Hugoniot*:

$$\frac{\mathrm{d}A}{A}+\frac{\mathrm{d}v}{v}\left(1-\frac{v^2}{a^2}\right)=0, \tag{5-13}$$

sau

$$\frac{\mathrm{d}A}{A}+\frac{\mathrm{d}v}{v}\left(1-M^2\right)=0, \tag{5-14}$$

unde $M=v/a$ reprezintă numărul lui Mach.

Se poate scrie şi relaţia diferenţială între *v* şi *p* sub forma:

$$\frac{\mathrm{d}v}{v}+\frac{1}{M^2k}\frac{\mathrm{d}p}{p}=0. \tag{5-15}$$

Relaţia lui Hugoniot arată că într-un ajutaj dat, în care există o curgere adiabatică reversibilă:

a) Dacă $v<a$, ($M<1$ – viteze subsonice), viteza variază în sens invers cu secţiunea: $\mathrm{d}v>0$ dacă $\mathrm{d}A<0$.

b) Dacă $v>a$, ($M>1$ – viteze supersonice), viteza variază în acelaşi sens cu secţiunea: $\mathrm{d}v>0$ dacă $\mathrm{d}A>0$.

c) Viteza de curgere a unui fluid nu poate fi egală cu viteza locală a sunetului ($v=a,\ M=1$) decât într-o secţiune unde aria *A* prezintă un extrem. Acest extrem nu poate fi decât un minim deoarece, conform situaţiilor a) şi b), nu se poate trece de la regim subsonic la regim critic sau de la regim supersonic la regim critic decât prin micşorarea secţiunii.

5.1.2. RELAŢIA LUI BARRÉ DE SAINT-VENANT. DEBITUL MASIC ÎN REGIM DE BLOCAJ

Pornind de la ecuaţia 5-2 şi neglijând termenul corespunzător forţei masice se obţine:

$$d\left(\frac{v^2}{2}\right)+dH=0,$$

iar prin integrare rezultă:

$$\frac{v^2}{2}+H=ct. \tag{5-16}$$

Pentru gazul perfect $\left[H=c_pT=(k/k-1)(p/\rho)\right]$ relaţia 5-16 devine:

$$\frac{v^2}{2}+\frac{k}{k-1}\frac{p}{\rho}=ct. \tag{5-17}$$

Dacă se notează p_0, ρ_0, T_0 parametrii caracteristici ai gazului sau amestecului de gaze într-o secţiune S_0 unde viteza este $v_0=0$ (cazul alimentării ajutajului dintr-un recipient sau dintr-o conductă cu diametru foarte mare în raport cu diametrul caracteristic al ajutajului) şi se aplică relaţia 5-16, se obţine

$$\frac{v^2}{2}+H=H_0 \quad \text{sau} \quad \frac{v^2}{2}+\frac{k}{k-1}\frac{p}{\rho}=\frac{k}{k-1}\frac{p_0}{\rho_0},$$

de unde rezultă expresia vitezei:

$$v=\sqrt{\frac{2k}{k-1}\left(\frac{p_0}{\rho_0}-\frac{p}{\rho}\right)}=\sqrt{\frac{2k}{k-1}R\left(T_0-T\right)}.$$

Curgerea amestecului gazos prin ajutaj fiind izentropică şi deci:

$$\frac{p}{\rho^k}=\frac{p_0}{\rho_0^k} \quad \text{sau} \quad \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^k=\frac{p_0}{p},$$

rezultă următoarea expresie a vitezei locale în lungul ajutajului, în funcţie de parametrii amestecului gazos la intrarea (p_0 şi ρ_0):

$$v=\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{p_0}{\rho_0}\left[1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}. \tag{5-18}$$

Aceasta este relaţia lui Barré de Saint-Venant cu ajutorul căreia se poate calcula viteza v într-o anumită secţiune a ajutajului, în funcţie de parametrii caracteristici ai fluidului în amonte de ajutaj (p_0, ρ_0) în ipoteza că viteza de acces în ajutaj poate fi neglijată ($v=0$).

Limita superioară pentru viteza de curgere se poate determina pornind de la relaţia lui Barré de Saint-Venant şi considerând o detentă a gazului de la presiunea p_0 la presiunea vidului $(p=0)$. În acest caz, deoarece $p=0$, $p/\rho=0$ şi $T=0$ se obţine:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2k}{k-1}\,\frac{p_0}{\rho_0}} = a_0\sqrt{\frac{2}{k-1}} = \sqrt{k\,RT_0}\,\sqrt{\frac{2}{k-1}}, \tag{5-19}$$

unde a_0 este celeritatea corespunzătoare condiţiilor de alimentare a ajutajului.

Debitul masic printr-un ajutaj cu condiţii de alimentare $v_0 = 0$, p_0 şi T_0 se obţine înlocuind în relaţia debitului masic $q_m = \rho A v$ expresia vitezei *v* dată de relaţia lui Barré de Saint-Venant:

$$q_m = \rho\, A \sqrt{\frac{2k}{k-1}\,\frac{p_0}{\rho_0}\left[1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}. \tag{5-20}$$

Deoarece curgerea prin ajutaj este izentropică şi deci $p/\rho^k = p_0/\rho_0^k$ sau $\rho = \rho_0\,(p/p_0)^{1/k}$, se obţine expresia debitului masic de gaz:

$$q_m = A\,\rho_0\left(\frac{p}{p_0}\right)^{1/k}\sqrt{\frac{2k}{k-1}\,\frac{p_0}{\rho_0}}\,\sqrt{1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}}\,. \tag{5-21}$$

Introducând viteza maximă $v_{\max}$ conform relaţiei 5-19 şi notând:

$$Y = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1/k}\sqrt{1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}}\,, \tag{5-22}$$

se poate scrie expresia debitului masic prin ajutaj:

$$q_m = \rho_0\,A v_{\max} Y. \tag{5-23}$$

Se observă că pentru parametrii corespunzători alimentării ajutajului (p_0, ρ_0 şi T_0) constanţi, debitul masic variază cu produsul AY. Considerând că pentru un anumit fluid exponentul adiabatic *k* este o constantă, se poate analiza variaţia lui *Y* funcţie de raportul p/p_0:

$$Y = 0 \qquad \text{pentru} \qquad \begin{cases} p = 0 & \left(p/p_0 = 0\right) \\ p/p_0 = 1 \end{cases}.$$

Funcţia *Y* are un maxim pentru valoarea lui p/p_0 care anulează derivata. Această valoare este:

$$\frac{p_{cr}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \tag{5-24}$$

unde p_{cr} reprezintă presiunea la starea critică corespunzătoare atingerii vitezei locale a sunetului.

Revenind la expresia debitului masic 5-23 şi considerând că p_0, ρ_0 şi T_0 sunt constante, debitul q_m este o constantă şi deci se poate scrie relaţia:

$$\mathrm{d}q_m = Y\mathrm{d}A + A\mathrm{d}Y = 0.$$

Pentru Y maxim, $\mathrm{d}Y = 0$, de unde rezultă că $\mathrm{d}A = 0$ şi deoarece Y este maxim, q_m fiind constant, rezultă că secţiunea A este minimă. Rezultă deci, că valoarea lui Y maxim ($Y = Y_{cr}$), care se obţine pentru:

$$\frac{p_{cr}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}},$$

nu poate fi realizată decât în secţiunea minimă a ajutajului (în colul ajutajului: $A_{min} = A_{cr} = A_{col}$). Pentru această secţiune minimă, A_{cr}, se pot scrie relaţiile:

$$\frac{p_{cr}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \tag{5-25}$$

$$Y_{cr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \frac{k-1}{k+1}, \tag{5-26}$$

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{2k}{k-1}\,\frac{p_0}{\rho_0}\left[1-\left(\frac{p_{cr}}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} = a_0\sqrt{\frac{2}{k+1}}. \tag{5-27}$$

Exprimând viteza sunetului a_{cr} în condiţiile corespunzătoare secţiunii critice $A_{cr}\,(p_{cr}, \rho_{cr}, T_{cr})$ se poate demonstra că

$$v_{cr} = a_{cr} = \sqrt{k\,RT_{cr}} = \sqrt{k\frac{p_{cr}}{\rho_{cr}}} \tag{5-28}$$

şi deci

$$\frac{\rho_{cr}}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \text{şi} \quad \frac{T_{cr}}{T_0} = \frac{2}{k+1}, \tag{5-29}$$

iar debitul masic are expresia:

$$Q_m = q_{cr} = \rho_{cr}\,A_{cr}\,v_{cr}. \tag{5-30}$$

Astfel, pentru aer şi amestecuri NITROX, la care exponentul adiabatic este $k = 1,405$, se obţine:

$$\frac{p_{cr}}{p_0} = 0,527 \quad ; \quad \frac{\rho_{cr}}{\rho_0} = 0,634 \quad ; \quad \frac{T_{cr}}{T_0} = 0,832,$$

iar pentru heliu, la care exponentul adiabatic este $k = 1{,}666$, se obţine:

$$\frac{p_{cr}}{p_0} = 0{,}487 \quad ; \quad \frac{\rho_{cr}}{\rho_0} = 0{,}649 \quad ; \quad \frac{T_{cr}}{T_0} = 0{,}750.$$

Când presiunea din aval scade, debitul masic prin ajutaj creşte corespunzător relaţiei 5-23.

Dacă detenta pe ajutaj este redusă, raportul p / p_0 fiind apropiat de valoarea 1 pe toată lungimea ajutajului, punctul figurativ al lui Y se deplasează pe ramura AC a curbei $Y = f(p / p_0)$ din figura 5.3, curgerea fiind subsonică pentru întregul ajutaj.

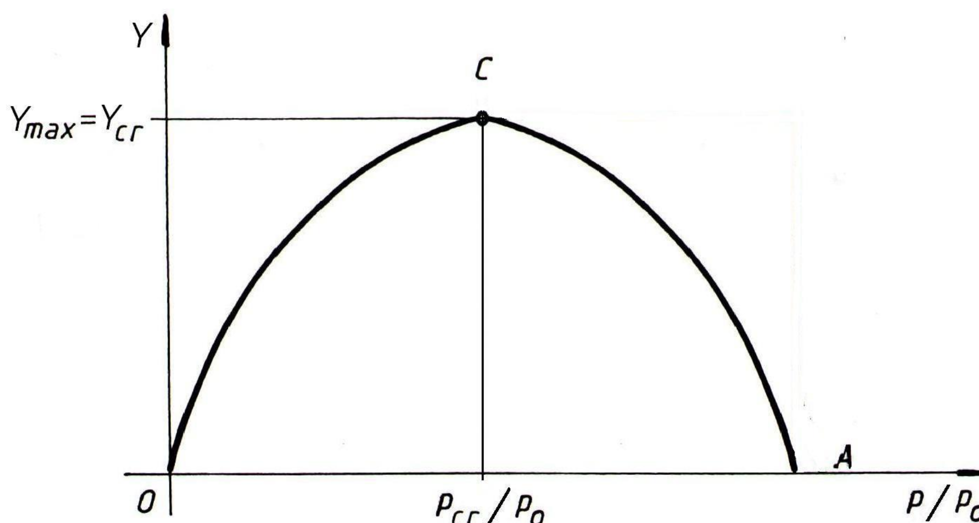


Fig. 5.3. Variaţia lui Y în funcţie de raportul p / p_0.

În cazul în care detenta este suficient de puternică, raportul p / p_0 poate deveni mai mic decât 1 şi punctul figurativ se deplasează pe ramura CO a curbei $Y = f(p / p_0)$ din figura 5.3. În această situaţie, în lungul ajutajului poate exista o secţiune A_{cr} pentru care Y este maxim şi egal cu Y_{cr}, corespunzător punctului C de pe curbă. Secţiunea A_{cr} este secţiunea minimă a ajutajului, unde se ating parametrii critici p_{cr}, v_{cr} (viteza sunetului), ρ_{cr} şi T_{cr}. În alte secţiuni din lungul ajutajului $A > A_{cr}$, deoarece debitul masic rămâne constant în lungul curgerii şi deci $AY = A_{cr} Y_{cr} = ct.$, rezultă că $Y < Y_{cr}$ şi pot exista două situaţii:

a) situaţia unde $p > p_{cr}$ (ramura CA) curgerea fiind subsonică;

b) situaţia unde $p < p_{cr}$ (ramura OC) curgerea fiind supersonică.

Această curgere se obţine în mod obligatoriu.

În amonte de secţiunea minimă, A_{cr}, mişcarea este întotdeauna subsonică, iar în aval de aceasta curgerea poate fi subsonică sau supersonică. Debitul masic care curge prin ajutajul de injecţie masică variază crescător cu scăderea presiunii din aval, fixându-se, la un moment dat, la valoarea sa maximă Q_m atunci când viteza în

secţiunea critică A_{cr} devine egală cu viteza locală a sunetului adică atunci când se ating parametrii critici. Acest debit maxim rămâne constant chiar dacă presiunea din aval continuă să scadă, fiind numit şi *debit în regim de blocaj*.

5.1.3. CURGEREA GAZELOR PRIN AJUTAJE CONVERGENTE

Deoarece la aparatele de respirat sub apă cu circuit închis, semiînchis şi mixt, interesează asigurarea unei injecţii de amestec gazos cu debit masic constant în raport cu adâncimea scufundării, se vor lua în considerare numai ajutajele convergente, care îndeplinesc condiţiile teoretice şi practice pentru a fi utilizate la circuitele de injecţie, compensare şi spălare cu amestec gazos sau oxigen aferente aparatelor de respirat sub apă speciale.

Se notează cu p_0, ρ_0, T_0 şi v_0 parametrii amestecului gazos sau oxigenului în amonte de ajutaj şi se face ipoteza că $v_0 = 0$, ipoteză perfect valabilă în cazul în care diametrul camerei de alimentare a ajutajului este mult mai mare decât diametrul colului ajutajului. De asemenea, se notează cu p_e şi $v_e = 0$, parametrii gazului la ieşire, iar cu $A_1 = A_{cr}$ secţiunea colului ajutajului (secţiunea minimă). Toţi parametrii din această secţiune se notează cu indicele 1 (fig. 5.4). Fiind vorba de un ajutaj convergent, $dA < 0$.

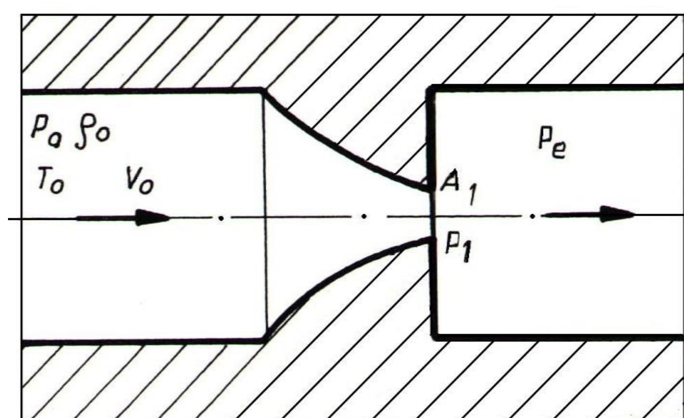


Fig. 5.4. Schema ajutajului convergent.

a) Dacă se consideră presiunea p_0 fixă şi se micşorează p_e plecând de la p_0, curgerea amestecului binar sintetic sau oxigenului fiind subsonică şi $dA < 0$, rezultă că $dv > 0$, iar debitul masic injectat q_m variază conform relaţiei lui Barré de Saint-Venant scrisă, pentru debit, sub forma:

$$q_m = A_1 \rho_0 \left(\frac{p_e}{p_0} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \tag{5-31}$$

Această relaţie este valabilă deoarece, pentru un raport $p_e / p_0 > p_{cr} / p_0$, presiunea p_1 este totdeauna egală cu p_e. Rezultă că, pentru acest domeniu, debitul

masic scade pe măsură ce raportul p_e / p_0 scade (fig. 5.5). Presiunea p_1 din secţiunea minimă A_1 este egală cu presiunea din aval datorită formării unui jet cilindric la ieşirea din ajutaj.

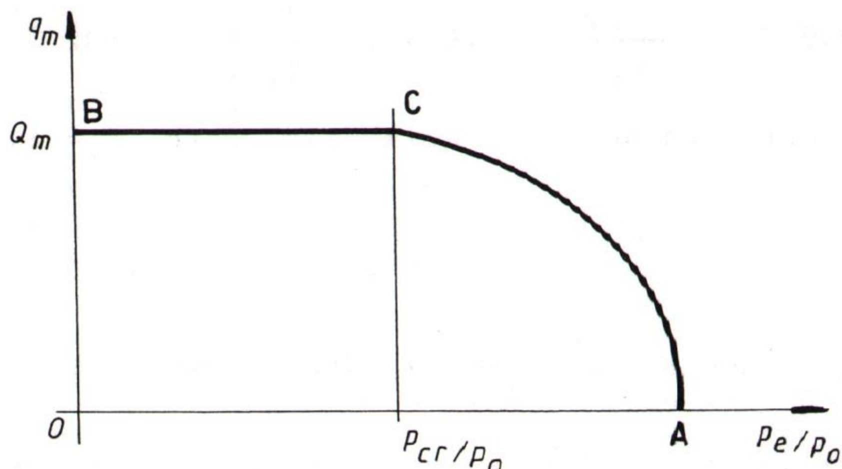


Fig. 5.5. Variaţia debitului masic q_m în funcţie de raportul p_e / p_0, pentru ajutajul convergent.

b) Atunci când presiunea din aval p_e devine egală cu presiunea critică, p_{cr}, adică atunci când:

$$\frac{p_e}{p_0} = \frac{p_{cr}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \tag{5-32}$$

în secţiunea minimă A_1 a ajutajului se obţine viteza sunetului, v_{cr} şi corespunzător rezultă parametrii critici p_{cr}, ρ_{cr} şi T_{cr}, iar debitul masic de amestec gazos prin ajutaj atinge valoarea maximă Q_m dată de expresia 5-30. Înlocuind în această relaţie expresia vitezei v_{cr} (5-28) se obţine:

$$Q_m = \rho_{cr} A_1 \sqrt{k R T_{cr}}, \tag{5-33}$$

dar, conform relaţiilor 5-29:

$$\rho_{cr} = \rho_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{şi} \quad T_{cr} = T_0 \frac{2}{k+1},$$

rezultă:

$$Q_m = \rho_0 A_1 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{(k+1)} R T_0}. \tag{5-34}$$

c) Când presiunea din aval p_e descreşte în continuare, astfel încât $p_e < p_{cr}$, adică atunci când

$$\frac{p_e}{p_0} < \frac{p_{cr}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \tag{5-35}$$

în secţiunea A_1 presiunea rămâne constantă şi egală cu presiunea critică ($p_1 = p_{cr}$), presiunea p_1 ne mai fiind egală cu presiunea din aval $p_e\,(p_1 > p_e)$. Apare, deci, o discontinuitate de presiune după secţiunea minimă A_1 care nu mai creează condiţiile formării unui jet cilindric ci a unei descărcări (unde de şoc) însoţite de un sistem complex de unde de compresie şi de rarefiere.

Debitul masic rămâne invariabil pentru întregul domeniu şi egal cu debitul maxim exprimat prin relaţia 5-34, (fig. 5.5).

Dacă în lungul ajutajului convergent are loc o detentă izentropică, după secţiunea A_1 când presiunea devine $p_1 < p_{cr}$ apare o detentă puternică de la p_{cr} la p_1 după un proces ireversibil, deci neizentropic. Pentru ajutajul convergent, ţinând cont că $p_0 / \rho_0 = RT_0$, expresia debitului masic injectat 5-31 de către ajutajul lucrând în domeniul subsonic ($p_{cr} / p_0 < p_e / p_0 < 1$) devine

$$q_m = A_1 \rho_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{RT_0} \left[\left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}. \tag{5-36}$$

Atunci când ajutajul convergent lucrează în regim critic ($p_{at} / p_0 < p_e / p_0 < p_{cr} / p_0$), expresia debitului masic injectat 5-34 devine (se ţine cont că $p_0 / \rho_0 = RT_0$):

$$Q_m = A_1 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}}\ \frac{p_0}{\sqrt{RT_0}}\ . \tag{5-37}$$

Toate ajutajele aferente aparatelor de respirat sub apă studiate sunt ajutaje convergente şi deci relaţiile de bază pentru calculul acestora sunt 5-36 şi 5-37.

5.2. DESCRIEREA MATEMATICĂ A CURGERII FLUIDELOR COMPRESIBILE ÎN BLOCURILE SPECIFICE APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ SPECIALE

În cele ce urmează, sunt prezentate modele matematice care descriu procesele la care sunt supuse gazele în circuitele aparatelor de respirat sub apă speciale. Se pune accentul pe fenomenele gazodinamice din sacul respirator şi din ajutajele aferente acestor aparate.

5.2.1. RELAŢIILE DE CALCUL AFERENTE SACULUI RESPIRATOR

Sacul respirator este un rezervor deformabil care joacă rolul de "plămân", conţinând un amestec respirator sau oxigen, la o presiune egală cu presiunea

hidrostatică corespunzătoare adâncimii la care se află scafandrul. Sistemele de alimentare ale sacului respirator trebuie să realizeze introducerea permanentă a unui debit masic constant de gaz, care să asigure acoperirea consumului de oxigen maximal al scafandrului.

Spre exemplu, în cazul aparatelor de respirat sub apă cu injecţie masică de amestec gazos, debitul de amestec injectat în sac Q_{ai}, trebuie să conducă la înlocuirea oxigenului consumat $Q_{O_2,c}$ în cadrul proceselor metabolice. Surplusul de amestec respirator din sac este eliminat în mediul ambiant prin supapa de evacuare.

Cum consumul de oxigen al scafandrului este în funcţie de efortul depus de acesta sub apă, rezultă că şi valoarea debitului de amestec gazos injectat în sacul respirator va fi funcţie de compoziţia amestecului şi de activitatea depusă sub apă de scafandru, astfel încât masa de oxigen injectată prin intermediul amestecului să fie cel puţin egală cu masa de oxigen consumată. În sacul respirator se va obţine un amestec cu caracteristici mai mult sau mai puţin apropiate de cele ale amestecului injectat. Se urmăreşte ca presiunea parţială a oxigenului din sac $p_{O_2,s}$ să nu scadă sub valoarea limită inferioară de 170 mbar (sc. abs.) pentru evitarea pericolului de hipoxie şi să nu crească peste valoarea limită superioară de 210 mbar (sc. abs.) pentru evitarea pericolului de hiperoxie.

Schema de calcul a sacului respirator este prezentată în figura 5.6. În continuare, se prezintă relaţiile de calcul, pornind de la ecuaţiile de continuitate scrise cu debite volumice la starea normală (fig. 5.6):

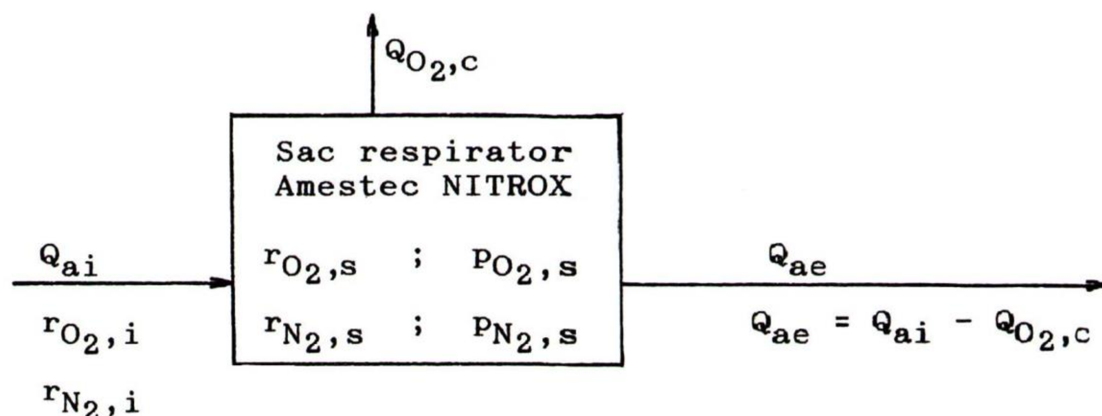


Fig. 5.6. Schema de calcul a sacului respirator.

$$\begin{cases} Q_{ae} = Q_{ai} - Q_{O_2,c} \\ Q_{O_2,e} = Q_{O_2,i} - Q_{O_2,c} \end{cases}, \tag{5-38}$$

care, prin înmulţire cu timpul t, devin:

$$\begin{cases} V_{ae} = t\left(Q_{ai} - Q_{O_2,c}\right) \\ V_{O_2,e} = t\left(Q_{Q_2,i} - Q_{O_2,c}\right) \end{cases}, \tag{5-39}$$

unde $Q_{O_2,e}$ este debitul de oxigen evacuat din sac [N1/s], Q_{ae} debitul de amestec evacuat din sac [N1/s], V_{ae} volumul amestecului evacuat din sac [N1], $V_{O_2,e}$ volumul de oxigen evacuat prin V_{ae} [N1], iar *t* timpul considerat [s]. Ţinând cont de relaţiile 5-39 se poate determina participaţia volumică a oxigenului din sac:

$$r_{O_2,s} = \frac{V_{O_2,e}}{v_{ae}} = \frac{Q_{O_2,i} - Q_{O_2,c}}{Q_{ai} - Q_{O_2,c}}. \qquad (5\text{-}40)$$

Participaţia volumică a azotului din amestecul aflat în sacul respirator va fi:

$$r_{N_2,s} = 1 - r_{O_2,s}, \qquad (5\text{-}41)$$

unde $r_{O_2,s}$ este presiunea parţială a oxigenului din amestecul aflat în sac.

Presiunea parţială a oxigenului din sac, la adâncimea de lucru a scafandrului *h* [m], căreia îi corespunde o presiune în sacul respirator p_s, va fi:

$$p_{O_2,s} = r_{O_2,s}\, p_s = \frac{Q_{O_2,i} - Q_{O_2,c}}{Q_{ai} - Q_{O_2,c}} p_s, \qquad (5\text{-}42)$$

unde presiunea din sacul respirator exprimată în bar (sc. abs.) este :

$$p_s = \frac{h+10}{10}.$$

Pentru determinarea debitului de amestec injectat Q_{ai} şi a participaţiei volumice a oxigenului injectat $r_{O_2,i}$, se pun condiţiile la limită:

– la suprafaţă ($h = 0$), se consideră consumul de oxigen maximal ($Q_{O_2,c}^{\max} = 3$ N1/ min), în sacul respirator rezultând presiunea parţială a oxigenului cea mai mică posibilă $p_{O_2,s}^{\min}$:

– la adâncimea maximă ($h = h_{\max}$), se consideră consumul minim de oxigen ($Q_{O_2,c}^{\min} = 0,25$ N1/ min), în sacul respirator rezultând presiunea parţială a oxigenului cea mai mare posibilă $p_{O_2,s}^{\max}$.

Rezultă un sistem de două ecuaţii cu două necunoscute, Q_{ai} şi $r_{O_2,i}$:

$$\begin{cases} p_{O_2,s}^{\min} = \dfrac{r_{O_2,i}\, Q_{ai} - 3}{Q_{ai} - 3} \\[2ex] p_{O_2,s}^{\max} = \dfrac{r_{O_2,i}\, Q_{ai} - 0,25}{Q_{ai} - 0,25}\ \dfrac{h_{\max} + 10}{10}. \end{cases} \qquad (5\text{-}43)$$

Din rezolvarea sistemului rezultă expresiile debitului de amestec injectat Q_{ai} şi participaţiei volumice a oxigenului din amestecul injectat $r_{O_2,i}$:

$$Q_{ai} = \frac{3\,p_{O_2,s}^{\min}\,\frac{h_{\max}+10}{10} - 0,25\;p_{O_2,s}^{\max} - 2,75\;\frac{h_{\max}+10}{10}}{p_{O_2,s}^{\min}\,\frac{h_{\max}+10}{10} - p_{O_2,s}^{\max}},$$

$$r_{O_2,i} = p_{O_2,s}^{\min} - \frac{\left(3\,p_{O_2,s}^{\min} - 3\right)\left(p_{O_2,s}^{\min}\,\frac{h_{\max}+10}{10} - p_{O_2,s}^{\max}\right)}{3\,p_{O_2,s}^{\min}\,\frac{h_{\max}+10}{10} - 0,25\,p_{O_2,s}^{\max} - 2,75\frac{h_{\max}+10}{10}}, \tag{5-44}$$

unde unităţile de măsură ale mărimilor din expresiilor de mai sus sunt: Q_{ai} $[\mathrm{N1/min}]$, $p_{O_2,s}^{\max}$ şi $p_{O_2,s}^{\min}$ [bar (sc. abs.)], $h_{\max}$ $[\mathrm{m}]$.

Cunoscând participaţiile volumice ale oxigenului şi azotului din amestecul injectat ($r_{O_2,i}$ şi $r_{N_2,i}$) şi masele molare ale oxigenului $\mathcal{M}_{O_2}$ [kg/kmol] şi azotului $\mathcal{M}_{N_2}$ [kg/kmol] se poate calcula masa molară a amestecului injectat, $\mathcal{M}_{ai}$:

$$\mathcal{M}_{ai} = r_{O_2,i}\,\mathcal{M}_{O_2} + r_{N_2,i}\,\mathcal{M}_{N_2}. \tag{5-45}$$

Participaţiilor masice ale oxigenului $m_{O_2,i}$ şi azotului $m_{N_2,i}$ vor fi:

$$m_{O_2,i} = r_{O_2,i}\,\frac{\mathcal{M}_{O_2}}{\mathcal{M}_{N_2}}, \tag{5-46}$$

$$m_{N2,i} = 1 - m_{O2,i} \tag{5-47}$$

Căldurile specifice ale amestecului injectat la presiune constantă $c_{p,a}^{i}$ $[\mathrm{J/(kg\cdot K)}]$ şi la volum constant $c_{v,a}^{i}$ $[\mathrm{J/(kg\cdot K)}]$ se calculează cu relaţiile:

$$c_{p,a}^{i} = m_{O_2,i}\;c_{p,O_2} + m_{N_2,i}\;c_{p,N_2}, \tag{5-48}$$

$$c_{v,a}^{i} = m_{O_2,i}\;c_{v,O_2} + m_{N_2,i}\;c_{v,N_2}. \tag{5-49}$$

Se mai pot calcula:

– constanta specifică a amestecului injectat R_{ai} $[\mathrm{J/(kg\cdot K)}]$ cu expresia

$$R_{ai} = \frac{\mathcal{R}}{\mathcal{M}_{ai}}, \tag{5-50}$$

unde: $\mathcal{R}$ = 8314,3 J (kmol · K), este constanta universală a gazelor;

– exponentul adiabatic (izentropic) pentru amestecul injectat k_{ai} cu expresia:

$$k_{ai} = \frac{c_{p,a}^{i}}{c_{v,a}^{i}}. \tag{5-51}$$

5.2.2. RELAŢIILE DE CALCUL PENTRU AJUTAJELE DE INJECŢIE ŞI DE SPĂLARE

Ajutajele de injecţie şi de spălare asigură injecţia la debit masic constant a gazului sau amestecului de gaze stocat într-o butelie de înaltă presiune. Ajutajele funcţionează în regim sonic (critic) la debit masic constant (independent de adâncimea scufundării). Relaţia de bază pentru calcul este relaţia 5-37. Ţinând cont de elementele specifice ale acestor ajutaje, relaţiile de calcul sunt prezentate în continuare.

a) *Relaţiile pentru calculul debitului de amestec injectat în regim de blocaj*:

– debitul masic de amestec respirator sau de gaz pur injectat Q_{mi} [kg/s], are următoarea expresie:

$$Q_{mi} = A_1 \left(\frac{2}{k_i + 1} \right)^{\frac{1}{k_i - 1}} \sqrt{\frac{2k_i}{k_i + 1}} \frac{p_0 \cdot 10^5}{\sqrt{R_i T_0}}; \tag{5-52}$$

– debitul volumic de amestec sau gaz pur, Q_i [N1/min] are expresia:

$$Q_i = \frac{Q_{mi} R_i}{0,005685}. \tag{5-53}$$

b) *Relaţiile pentru calculul ariei* A_1 *şi a diametrului* d_1 *ale secţiunii minime a ajutajului de injecţie*:

– aria secţiunii minime, A_1 [m²]:

$$A_1 = \frac{Q_{mi} \sqrt{R_i}}{\left(\frac{2}{k_i + 1} \right)^{\frac{1}{k_i - 1}} \sqrt{\frac{2k_i}{k_i + 1}}} \frac{\sqrt{T_0}}{p_0 \cdot 10^5}; \tag{5-54}$$

– diametrul secţiunii minime a ajutajului, d_1 [mm] este:

$$d_1 = 1128,379 \sqrt{A_1}.$$

În locul indicelui mi se va scrie indicele ma,i pentru amestec gazos NITROX şi indicele mO_2,i pentru oxigen, iar în locul indicelui i se va scrie indicele a,i pentru NITROX şi O_2,i pentru oxigen. Pentru ajutajele de spălare se pune problema şi a timpului de funcţionare, care este egal cu timpul de compensare cu amestec gazos (NITROX asu oxigen). Relaţiile de calcul sunt prezentate în cele ce urmează.

5.2.3. RELAŢIILE DE CALCUL PENTRU AJUTAJELE DE COMPENSARE

Deducerea relaţiilor de calcul pentru ajutajele de compensare se va realiza prin scrierea ecuaţiilor specifice de mecanica fluidelor compresibile pentru ansamblurile funcţionale pe care le realizează aceste ajutaje împreună cu mecanismele de spălare (fig. 5.1).

Ajutajele de compensare au rolul de a asigura o limitare a timpului de alimentare cu gaz (amestec NITROX sau oxigen) a ajutajelor de spălare a sacului respirator. Acest lucru se realizează printr-o alimentare controlată cu gaz a

compartimentului superior (de deasupra membranei elastice) a mecanismului de spălare, ceea ce conduce, după un anumit timp, prin creşterea presiunii din acest compartiment, la închiderea alimentării cu gaz a ajutajului de spălare.

În compartimentul superior al mecanismului de spălare, înainte de începerea compensării, există o presiune iniţială notată cu $p_{e,in}$, practic egală cu presiunea din aval de ajutajul de compensare. Din timpul total de compensare t_c, în primul interval de timp t', ajutajul de compensare funcţionează în regim critic injectând către compartimentul superior al mecanismului de spălare un debit masic de gaz constant Q_m, independent de variaţia presiunii din compartimentul superior p_e, iar în cel de-al doilea interval de timp t'', ajutajul de compensare funcţionează în regim subsonic injectând către compartimentul superior un debit masic de gaz q_m, care scade pe măsură ce creşte presiunea p_e.

Pentru starea intermediară a gazului din compartimentul superior se poate scrie, la un moment dat:

$$p_e V_c = M\, R_1 T_c \quad \text{sau} \quad M = \frac{p_e V_c}{R_1 T_c}, \tag{5-55}$$

unde M este masa gazului din compartimentul superior, V_c volumul compartimentului superior, T_c temperatura absolută a gazului din compartimentul superior, iar R_1 constanta gazului din compartimentul superior.

Masa M creşte în timpul funcţionării ajutajului de compensare, volumul V_c este practic constant, temperatura T_c poate fi admisă practic constantă, iar constanta R_1 se modifică datorită schimbării amestecului de gaz din compartimentul superior.

Dacă, în raport cu acest moment, se consideră un interval elementar de timp, $\mathrm{d}t$, din timpul de funcţionare a ajutajului de compensare, în compartimentul superior are loc o creştere a masei de gaz, $\mathrm{d}M$, masa atingând valoarea $M + \mathrm{d}M$, ceea ce conduce la o creştere a presiunii în compartiment cu $\mathrm{d}p$, presiunea ajungând la valoarea $p_e + \mathrm{d}p_e$. Se poate scrie pentru cea de-a doua stare intermediară a gazului în compartimentul superior:

$$\left(p_e + \mathrm{d}p_e\right) V_c = \left(M + \mathrm{d}M\right) R_1 T_c . \tag{5-56}$$

Pentru simplificare, lucrând cu o valoare acoperitoare a constantei gazului, din punct de vedere al calculului, se admite că R_1 rămâne constant.

Din relaţiile 5-55 şi 5-56 rezultă:

$$\mathrm{d}M = \frac{V_c}{R_1 T_c}\, \mathrm{d}p_e. \tag{5-57}$$

Pentru primul interval de timp în care are loc o compensare cu debit masic constant Q_m (regim critic cu debit masic blocat), se poate scrie:

$$Q_m\, \mathrm{d}t = \mathrm{d}M \quad ; \quad \mathrm{d}t = \frac{\mathrm{d}M}{Q_m} \quad ; \quad \mathrm{d}t = \frac{1}{Q_m}\, \frac{V_c}{R_1 T_c}\, \mathrm{d}p_e .$$

Prin integrarea între limitele de presiune $p_{e,in}$ şi $p_{cr,c}$ (presiunea critică corespunzătoare colului ajutajului de compensare), se obţine timpul t' de compensare pentru funcţionarea ajutajului în regim sonic (fig. 5.5):

$$t' = \frac{1}{Q_m}\frac{V_c}{R_1 T_c}\int_{p_{e,in}}^{p_{cr,c}} \mathrm{d}p_e \quad ; \quad t' = \frac{1}{Q_m}\frac{V_c}{R_1 T_c}\left(p_{cr,c} - p_{e,in}\right),$$

de unde, ţinând cont de relaţia 5-37 unde $\sqrt{\frac{2k}{k+1}} = \sqrt{\frac{2k}{k-1}}\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}$, rezultă relaţia:

$$t' = \frac{V_c}{R_1 T_c}\frac{1}{A_1\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{1}{R_1 T_0}}}\frac{1}{\left(\frac{2k}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}}\left(\frac{p_{cr,c}}{p_0} - \frac{p_{e,in}}{p_0}\right), \tag{5-58}$$

unde A_1 este aria secţiunii minime a ajutajului de compensare, k coeficientul adiabatic (izentropic) pentru gazul cu care este alimentat ajutajul, R_1 constanta specifică a gazului, p_0 presiunea gazului în amonte de ajutaj, iar T_0 temperatura absolută a gazului în amonte de ajutaj.

Pentru cel de-al doilea interval de timp, în care are loc o compensare cu debit masic variabil q_m, care scade pe măsură ce creşte presiunea p_e (regim subsonic), se poate scrie:

$$q_m\,\mathrm{d}t = \mathrm{d}M \quad ; \quad \mathrm{d}t = \frac{\mathrm{d}M}{q_m} \quad ; \quad \mathrm{d}t = \frac{1}{q_m}\frac{V_c}{R_1 T_c}\mathrm{d}p_e$$

şi ţinând cont de relaţia 5-36:

$$\mathrm{d}t = \frac{V_c}{R_1 T_c}\frac{1}{A_1 p_0\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{1}{R_2 T_0}}}\frac{\mathrm{d}p_e}{\sqrt{\left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}}},$$

unde R_2 este constanta specifică gazului în cea de-a două etapă a compensării (se poate aproxima $R_1 = R_2$).

Prin integrare între limitele de presiune $p_{cr,c}$ şi $p_{e,f}$ (presiunea finală din compartimentul superior) se obţine timpul t'' de compensare pentru funcţionarea ajutajului în regim subsonic:

$$t'' = \frac{V_c}{R_1 T_c}\frac{1}{A_1\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{1}{R_2 T_0}}}\int_{\frac{p_{cr,c}}{p_0}}^{\frac{p_{e,f}}{p_0}}\frac{\mathrm{d}\left(\frac{p_e}{p_0}\right)}{\sqrt{\left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}}}. \tag{5-59}$$

Timpul de compensare t_c, care este egal cu timpul de spălare a sacului respirator t_{sp}, se obţine adunând t' cu t'' şi deci:

$$t_c = t' + t''$$

şi dacă se notează:

$$S = \frac{V_c}{R_1 T_c} \frac{1}{A_1 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{R_2 T_0}}},$$

$$G = \frac{1}{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{k-1}{k+1}}} \left(\frac{p_{cr,c}}{p_0} - \frac{p_{e,in}}{p_0}\right),$$

$$F = \int_{\frac{p_{cr,c}}{p_0}}^{\frac{p_{e,f}}{p_0}} \frac{\mathrm{d}\left(\frac{p_e}{p_0}\right)}{\sqrt{\left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}}}$$

atunci

$$t_c = S\,(G+F) \quad (5\text{-}60)$$

Din relaţia 5-60, ţinând cont de expresiile lui S, G şi F, pentru un anumit timp de compensare se poate exprima aria secţiunii minime a ajutajului de compensare:

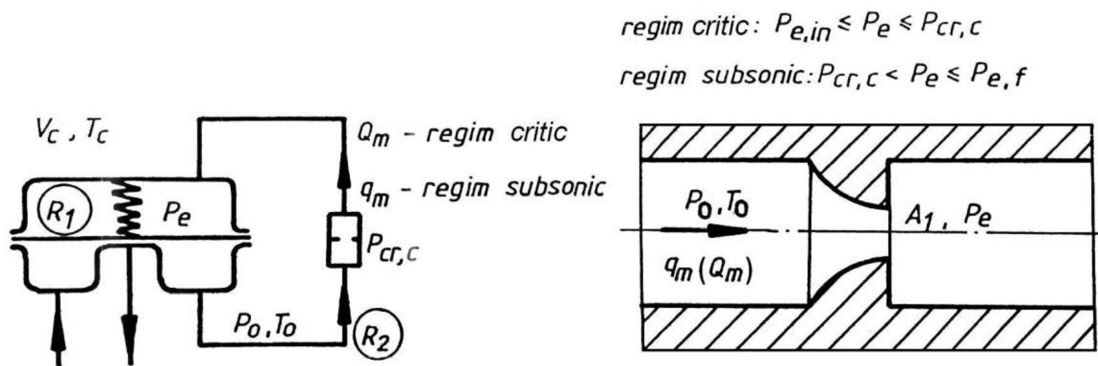
$$A_1 = \frac{V_c}{R_1 T_c} \frac{1}{t_c \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{R_2 T_0}}} (G+F),$$

de unde rezultă expresia diametrului secţiunii minime a ajutajului de compensare:

$$d_1 = 2\sqrt{\frac{A_1}{\pi}}.$$

Toate relaţiile de mai sus sunt valabile pentru mărimile fizice exprimate în orice sistem coerent de unităţi de măsură.

În figurile 5.7, 5.8 şi 5.9 sunt prezentate relaţiile de calcul generale pentru ajutajul de compensare şi respectiv relaţiile particularizate pentru amestec NITROX şi oxigen.



1. Timpul de compensare în regim critic (cu debit masic Q_m constant):

$$t' = \frac{V_c}{R_1 \cdot T_c} \cdot \frac{1}{A_1\sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{1}{R_2 T_0}}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}} \cdot \left(\frac{P_{cr,c}}{P_0} - \frac{P_{e,in}}{P_0}\right)$$

2. Timpul de compensare în regim subsonic (cu debit masic q_m variabil):

$$t'' = \frac{V_c}{R_1 T_c} \cdot \frac{1}{A_1\sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{1}{R_2 T_0}}} \cdot \int_{\frac{P_{cr,c}}{P_0}}^{\frac{P_{e,f}}{P_0}} \frac{d\left(\frac{P_e}{P_0}\right)}{\sqrt{\left(\frac{P_e}{P_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_e}{P_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}}}$$

3. Timpul total de compensare: $t_c = t' + t''$

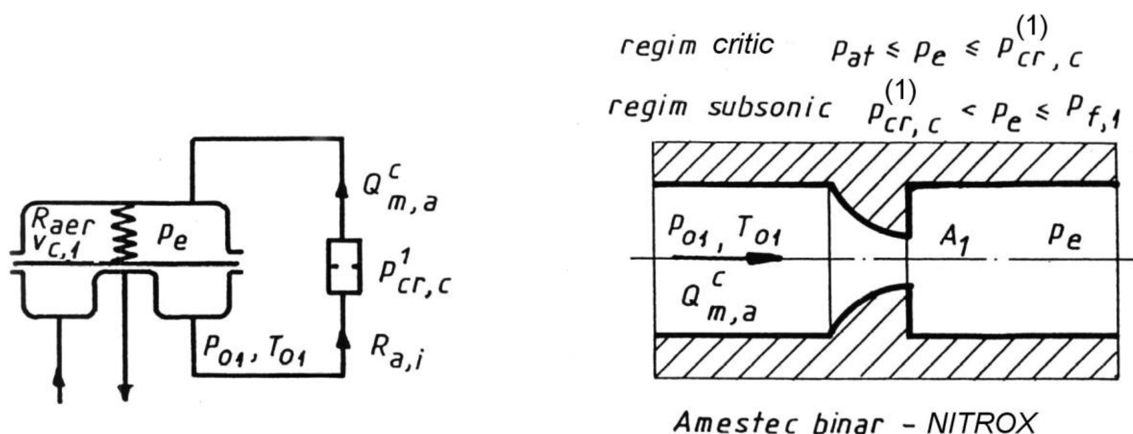
$$t_c = \underbrace{\frac{V_c}{R_1 T_c} \cdot \frac{1}{A_1\sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{1}{R_2 T_0}}}}_{S} \left[\underbrace{\frac{1}{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}} \cdot \left(\frac{P_{cr,c}}{P_0} - \frac{P_{e,in}}{P_0}\right)}_{G} + \right.$$

$$\left. + \underbrace{\int_{\frac{P_{cr,c}}{P_0}}^{\frac{P_{e,f}}{P_0}} \frac{d\left(\frac{P_e}{P_0}\right)}{\sqrt{\left(\frac{P_e}{P_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_e}{P_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}}}}_{F} \right] ; \quad t_c = S\left[G + F\right]$$

4. Aria secțiunii minime a ajutajului de compensare:

$$A_1 = \underbrace{\frac{V_c}{R_1 T_c} \cdot \frac{1}{t_c\sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{1}{R_z T_0}}}}_{E} \left(G + F\right) ; \quad A_1 = E\left(G + F\right)$$

Fig. 5.7. Relaţiile generale pentru calculul ajutajului de compensare.



1. Calculul secțiunii minime a ajutajului de compensare pentru amestec binar - NITROX, A_1 și d_1

$$E_1 = \frac{v_{c,1}\ 10^{-6}}{R_{aer}\ \ T_{c,1} \cdot t_{c,1}\ \sqrt{\dfrac{2\,k_{a,i}}{k_{a,i}-1}\ \dfrac{1}{R_{a,i}\cdot T_{01}}}}$$

$$G_1 = \frac{1}{\left(\dfrac{2}{k_{a,i}+1}\right)^{\frac{1}{k_{a,i}-1}}\sqrt{\dfrac{k_{a,i}-1}{k_{a,i}+1}}} \cdot \left(\frac{p_{cr,c}^{(1)}}{p_{01}} - \frac{p_{at}}{p_{01}}\right)$$

$$X_1 = \frac{p_e}{p_{01}}\ ,\ Z_{11} = \frac{p_{cr,c}^{(1)}}{p_{01}}\ ,\ Z_{21} = \frac{p_{f,1}}{p_{01}}\ ,\ B_{11} = \frac{2}{k_{a,i}}\ ,\ B_{21} = \frac{k_{a,i}+1}{k_{a,i}}$$

$$F_1 = \int_{Z_{11}}^{Z_{21}} \frac{1}{\sqrt{X_1^{B11} - X_1^{B21}}}\, d(X_1)$$

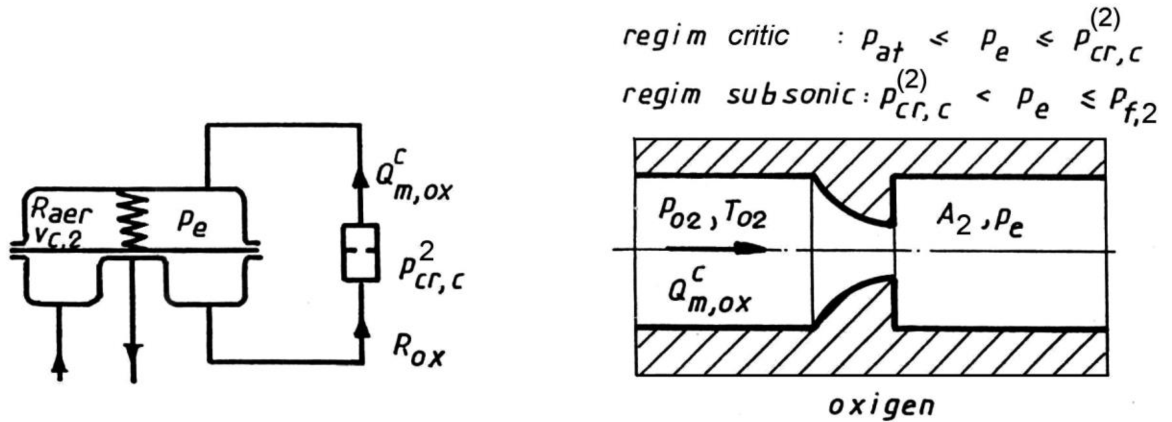
$$A_1 = E_1\left(G_1 + F_1\right) \qquad d_1 = 1128{,}379\sqrt{A_1}$$

2. Calculul timpului de compensare pentru amestec

$$S_1 = \frac{v_{c,1} \cdot 10^{-6}}{R_{aer} \cdot T_{c,1}\ \ A_1\sqrt{\dfrac{2\,k_{a,i}}{k_{a,i}-1} \cdot \dfrac{1}{R_{a,i}\cdot T_{01}}}}$$

$$t_{c,1} = S_1\left(G_1 + F_1\right)$$

Fig. 5.8. Relațiile generale aferente ajutajului de compensare pentru amestec respirator NITROX.



1. Calculul sectiunii minime a ajutajului de compensare pentru oxigen, A_2 și d_2

$$E_2 = \frac{v_{c,2} \cdot 10^{-6}}{R_{aer} \cdot T_{c,2} \cdot t_{c,2} \sqrt{\dfrac{2\,k_{ox}}{k_{ox}-1} \quad \dfrac{1}{R_{ox}\,T_{o2}}}}$$

$$G_2 = \frac{1}{\left(\dfrac{2}{k_{ox}+1}\right)^{\frac{1}{k_{ox}-1}} \sqrt{\dfrac{k_{ox}-1}{k_{ox}+1}}} \cdot \left(\frac{p_{cr,c}^{(2)}}{p_{o2}} - \frac{p_{at}}{p_{o2}}\right)$$

$$X_2 = \frac{p_c}{p_{o2}}, \quad Z_{12} = \frac{p_{cr,c}^{(2)}}{p_{o2}}, \quad Z_{22} = \frac{p_{f,2}}{p_o}, \quad B_{12} = \frac{2}{k_{ox}}, \quad B_{22} = \frac{k_{ox}+1}{k_{ox}}$$

$$F_2 = \int_{Z_{12}}^{Z_{22}} \frac{1}{\sqrt{X_2^{B_{12}} - X_2^{B_{22}}}}\, d(X_2) \qquad A_2 = E_2(G_2 + F_2)$$

$$d_2 = 1128{,}379\sqrt{A_2}$$

2. Calculul timpului de compensare pentru oxigen

$$S_2 = \frac{v_{c,2}\; 10^{-6}}{R_{aer} \cdot T_{c2} \cdot A_2 \sqrt{\dfrac{2\,k_{ox}}{k_{ox}-1} \quad \dfrac{1}{R_{ox} \cdot T_{o2}}}}$$

$$t_{c,2} = S_2\,(G_2 + F_2)$$

Fig. 5.9. Relațiile de calcul aferente ajutajului de compensare pentru oxigen.

5.2.4. CALCULUL TEORETIC AL AJUTAJELOR DE INJECŢIE LA DEBIT MASIC CONSTANT

Ajutajele de injecţie masică au rolul de a asigura intoducerea în sacul respirator al aparatelor de respirat în apă cu circuit închis, semiînchis sau mixt a unui debit de amestec gazos sintetic sau de oxigen, prin intermediul căruia să se acopere oxigenul consumat de scafandru. Masa de oxigen injectată în sacul repirator trebuie să rămână constantă indiferent de adâncimea scufundării.

Amestecurile binare utilizate în scufundări autonome sunt amestecuri NITROX sau HELIOX. Concentraţiile oxigenului din aceste amestecuri sunt, de obicei: 32,5; 40; 50 şi 60%, restul fiind gaz inert. Pentru aceste tipuri de amestecuri utilizate, adâncimile maxime de scufundare sunt determinate de atingerea limitei admise a presiunii parţiale a oxigenului ($p_{O_2} = 1{,}8$ bar (sc. abs.)).

Pentru diferite activităţi subacvatice, consumul de oxigen este diferit şi deci, debitele de amestecuri gazoase injectate în sacul respirator, pentru acoperirea consumului de oxigen, trebuie să fie acoperitoare.

În urma injectării masice de amestec binar, a consumului de oxigen şi a evacuării surplusului de amestec, în sacul respirator trebuie să rezulte, după un timp scurt, un amestec binar stabilizat, care să asigure consumul de oxigen al scafandrului. Astfel, amestecul din sacul respirator va avea o concentraţie de oxigen uşor inferioară concentraţiei de oxigen din amestecul stocat în butelii şi injectat, în mod continuu, în sacul respirator. Evident, cu cât debitul de amestec injectat este mai mare cu atât amestecul din sac este caracterizat printr-o concentraţie de oxigen mai apropiată de cea a amestecului injectat şi implicit mai stabil. Totuşi, injectarea unor debite de amestecuri mai mari conduc la un consum mai rapid al amestecului respirator stocat şi în consecinţă, la o micşorare a autonomiei. În aceste condiţii, amestecul stocat în butelii va avea o concentraţie de oxigen corespunzătoare unei presiuni parţiale mai mari (2 bar (sc. abs.)) la adâncimea maximă de utilizare.

Caracteristicile termofizice ale gazelor componente din amestecurile respiratorii utilizate în aparatele de respirat sub apă speciale, sunt prezentate în tabelul 5.1.

Tabelul 5.1

Caracteristicile termofizice ale gazelor din componenţa amestecurilor respiratorii

Gaze / Caracteristici	Azot	Heliu	Oxigen
Masa molară [kg/kmol]	28,013	4,002	31,999
Căldura specifică la presiune constantă c_p [J/(kg·K)]	1040	5234	919
Căldura specifică la volum constant c_v [J/(kg·K)]	743	3155	659
Constanta gazului $R = c_p - c_v$ [J/(kg·K)]	297	2079	260

Cu ajutorul caracteristicilor termofizice ale componentelor amestecurilor realizate cu acestea şi utilizate în scufundări autonome, se pot determina caracteristicile amestecurilor. Se vor determina masele molare $\mathcal{M}_a$ ale amestecurilor

de gaze, participaţiile masice ale componentelor *m*, căldurile specifice ale amestecurilor la presiune constantă c_p şi la volum constant c_v, constanta amestecului R_a, precum şi exponenţii adiabatici (izentropici) *k* corespunzători aceloraşi amestecuri, utilizând următoarele expresii de calcul, specifice amestecurilor de gaze:

Tabelul 5.2

Caracteristicile termofizice ale amestecurilor NITROX

Amestecuri NITROX / Mărimi caracteristice	$r_{O_2} = 0,325$ $r_{N_2} = 0,675$	$r_{O_2} = 0,40$ $r_{N_2} = 0,60$	$r_{O_2} = 0,50$ $r_{N_2} = 0,50$	$r_{O_2} = 0,60$ $r_{N_2} = 0,50$
a [kg/kmol]	29,308	29,606	30,005	30,404
m_{N_2} [–]	0,645	0,568	0,467	0,369
m_{O_2} [–]	0,355	0,432	0,533	0,631
c_p [J/(kg·K)]	997,045	987,728	975,507	963,649
c_v [J/(kg·K)]	713,180	706,712	698,228	689,996
R_a: $c_p - c_v$ [J/(kg·K)]	283,865	281,016	277,279	273,653
R_a: $\mathcal{R} / \mathcal{M}_a$ [J/(kg·K)]	283,687	280,831	277,097	273,460
k [–]	1,398	1,398	1,397	1,396

Tabelul 5.3

Caracteristicile termofizice ale amestecurilor HELIOX

Amestecuri HELIOX / Mărimi caracteristice	$r_{O_2} = 0,325$ $r_{He} = 0,675$	$r_{O_2} = 0,40$ $r_{He} = 0,60$	$r_{O_2} = 0,50$ $r_{He} = 0,50$	$r_{O_2} = 0,60$ $r_{He} = 0,40$
a [kg/kmol]	13,101	15,200	18,000	20,799
m_{He} [–]	0,206	0,158	0,111	0,077
m_{O_2} [–]	0,794	0,842	0,889	0,923
c_p [J/(kg·K)]	1807,890	1600,770	1397,965	1251,255
c_v [J/(kg·K)]	1173,176	1053,368	936,056	851,192
R_a: $c_p - c_v$ [J/(kg·K)]	634,714	547,402	461,909	400,063
R_a: $\mathcal{R} / \mathcal{M}_a$ [J/(kg·K)]	634,631	546,993	461,905	399,745
k [–]	1,541	1,519	1,493	1,470

$$\mathcal{M}_a = \Sigma r_i \mathcal{M}_i \quad ; \quad m_i = r_i \frac{\mathcal{M}_i}{\mathcal{M}_a};$$

$$c_p = \Sigma\, m_i\, c_{pi} \quad ; \quad c_v = \Sigma\, m_i\, c_{vi};$$

$$R_a = \frac{\mathcal{R}}{\mathcal{M}_a} \qquad \text{sau} \qquad R_a = c_p - c_v \quad ; \quad k = \frac{c_p}{c_v},$$

unde indicele i se referă la una dintre componente, $\mathcal{R}$ reprezintă constanta generală a gazelor, iar r reprezintă participaţia volumică a unui component. Efectuând calculele se obţin, pentru amestecurile standard utilizate, rezultatele prezentate în tabelele 5.2 şi 5.3.

5.3. CONCEPŢIA ŞI CALCULUL APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ SPECIALE

În continuare, se vor prezenta realizarea şi calculul principalelor aparate de respirat sub apă şi anume a aparatelor cu circuit închis, semiînchis şi mixt insistându-se asupra concepţiei acestor aparate originale şi asupra testelor experimentale efectuate asupra acestor echipamente.

5.3.1. CONCEPŢIA ŞI CALCULUL APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT ÎNCHIS CU OXIGEN, CU SPĂLARE AUTOMATĂ A SACULUI RESPIRATOR

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen sunt utilizate, prin excelenţă, în scopuri militare. Utilizarea oxigenului şi implicit a acestor tipuri de aparate a apărut ca urmare a necesităţii intervenţiilor subacvatice "silenţioase" la obiective de interes militar, fără a fi detectate de la suprafaţă prin lipsa bulelor de gaz expirate, fără a necesita paliere de decompresie la revenirea la presiunea atmosferică şi nu în ultimul rând, creşterii autonomiei scufundării. Acest subiect a fost abordat pentru perfecţionarea aparatelor de respirat sub apă existente, datorită riscului destul de mare în manevrare, risc ce se datorează următoarelor motive:

– spălarea necorespunzătoare a sacului respirator înaintea scufundării, pentru eliminarea aerului (în special a azotului) remanent, ceea ce a dus, destul de des, la moartea scafandrului prin anoxie;

– depăşirea adâncimii maxime de utilizare (6, 5, … , 7 m), ceea ce poate duce la accidente hiperoxice.

În ambele situaţii o vină o au utilizatorii care, fie se hazardează spre adâncimi mai mari decât cele admise, fie tratează cu superficialitate spălarea traiectului plămâni – – sac respirator.

5.3.1.1. Concepţia aparatului de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen, cu spălarea automată a sacului respirator

Pentru a elimina factorul uman în pregătirea aparatului pentru scufundare, s-a introdus în sistemul de alimentare a sacului respirator din aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, un dispozitiv automat de spălare.

Schema de principiu a acestui aparat conceput de specialişti din Centrul de Scafandri Constanţa şi din Departamentul de Hidraulică şi Protecţia Mediului din Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti este prezentată în figura 5.10.

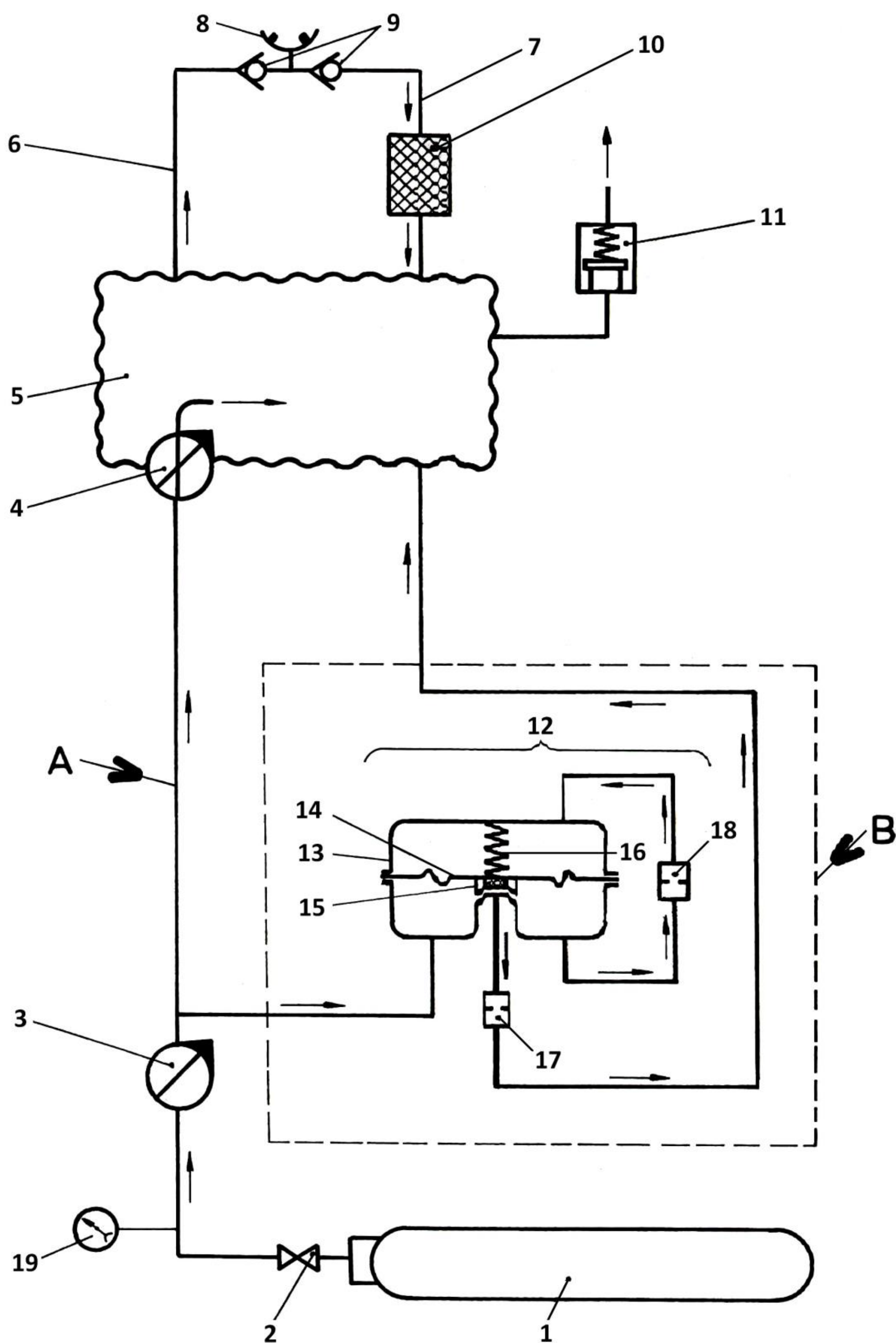


Fig. 5.10. Aparat de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen. (Explicaţia elementelor componente este prezentată în text).

Problema pe care o rezolvă aparatul este realizarea unui circuit de spălare iniţială a sacului respirator, în mod automat, fără ca scafandrul să mai fie preocupat, în mod special, de această operaţiune. Prin această spălare automată a sacului respirator se asigură, în interiorul acestuia, un amestec caracterizat printr-o concentraţie iniţială a oxigenului prestabilită, care nu va permite, în faza iniţială a scufundării, scăderea concentraţiei de oxigen sub limita impusă de pericolul apariţiei hipoxiei.

Aparatul (fig. 5.10) este constituit dintr-o butelie pentru stocarea oxigenului 1, prevăzută cu un robinet de înaltă presiune 2 de admisie a oxigenului către un regulator de presiune treapta întâi pilotat 3, având ca referinţă presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii de scufundare şi care are rolul de a reduce presiunea de la nivelul presiunii înalte existente în butelia 1, la nivelul presiunii medii necesară alimentării a două circuite: un circuit de livrare a oxigenului A şi un circuit de spălare automată B.

Aparatul de respirat sub apă cu oxigen este prevăzut cu un manometru etanş 19, care permite scafandrului să cunoască pe întreaga perioadă a scufundării presiunea din butelia de stocaj 1.

Circuitul de livrare a oxigenului A este prevăzut cu un regulator de presiune treapta a doua 4, încorporat într-un sac respirator 5. Acest regulator asigură livrarea, "la cerere", a oxigenului către sacul respirator, funcţionarea lui fiind comandată de presiunea creată în sac de consumul de oxigen în procesul respiraţiei. Regulatorul 4 asigură şi reducerea presiunii oxigenului de la nivelul presiunii medii de după reductorul de presiune pilotat 3, la nivelul presiunii existente în sacul respirator, egală cu presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii de scufundare.

Sacul respirator 5 are rolul de a prelua variaţiile de volum şi presiune rezultate prin respiraţie, de a aduce presiunea gazului din interior la nivelul presiunii hidrostatice corespunzătoare adâncimii de scufundare, precum şi de a asigura stocarea gazului, la parametrii doriţi, necesari respiraţiei.

Inspiraţia şi expiraţia din şi respectiv către sacul respirator 5 se realizează prin intermediul unui circuit de respiraţie alcătuit dintr-un furtun pentru inspiraţie 6 şi un furtun pentru expiraţie 7, racordate la o piesă bucală 8, prevăzută cu două supape unisens 9. Gazul expirat, care din punct de vedere teoretic este un amestec gazos de oxigen şi dioxid de carbon, trece în prealabil printr-un cartuş filtrant 10, care asigură reţinerea dioxidului de carbon din amestecul expirat. Sacul respirator este prevăzut cu o supapă de evacuare 11, care asigură evacuarea surplusului de gaz din sac către mediul acvatic ambiant. Acest surplus de gaz nu apare decât în momentul ridicării spre suprafaţă, când se destinde gazul din sacul respirator.

Circuitul de spălare automată B realizează spălarea controlată cu oxigen, a sacului respirator 5, înainte de scufundare, în interiorul căruia se află iniţial aer, într-un timp predeterminat, astfel încât la finele spălării să se obţină în interiorul sacului respirator un amestec foarte bogat în oxigen, care să asigure evitarea pericolului de apariţie a hipoxiei, în special în faza iniţială a scufundării. Circuitul de spălare B este alimentat cu oxigen gazos, la medie presiune, prin intermediul regulatorului de presiune pilotat 3 şi are în componenţă un mecanism de spălare 12 alcătuit dintr-o capsulă 13 cu pereţi nedeformabili, împărţită prin intermediul unei membrane elastice 14 în două compartimente. Solidar cu membrana elastică se află clapeta 15, care are rolul de a deschide sau închide accesul oxigenului, la presiune medie, dinspre

regulatorul de presiune pilotat 3, prin compartimentul inferior către un ajutaj convergent de spălare 17. Deasupra membranei elastice este prevăzut un arc elicoidal 16, astfel dimensionat şi tarat încât să asigure o deformare controlată a acesteia.

Ajutajul convergent de spălare lucrând în regim critic în secţiunea minimă, asigură injecţia unui debit masic de oxigen pentru spălare, constant, către sacul respirator 5.

Mecanismul de spălare 12 mai este prevăzut şi cu un ajutaj convergent de compensare 18, care face legătura între compartimentele capsulei 13, asigurând apariţia unui debit de gaz controlat din compartimentul inferior către cel superior până ce diferenţa de presiune se reduce la o valoare care să permită închiderea clapetei 15. Această compensare a presiunilor are loc într-un timp predeterminat, ajutajul 18 având rolul de temporizare a deschiderii clapetei 15. Ajutajul convergent de compensare 18 lucrează în primul interval al timpului de compensare în regim critic în secţiunea minimă, iar în al doilea interval de timp în regim subsonic în secţiunea minimă.

Timpul de spălare a sacului respirator, deci timpul de funcţionare a ajutajului convergent de spălare este impus de necesitatea obţinerii, în interiorul sacului, a unui amestec bogat în oxigen. Injectarea la debit masic constant a oxigenului pentru spălarea sacului respirator se face prin funcţionarea ajutajului convergent de spălare într-un punct de lucru caracterizat printr-un raport între presiunile din aval şi amonte de acesta, p_s / p_0, mai mic decât valoarea critică a raportului $p_{cr,sp} / p_0$, pentru o valoare dată a lui p_0. Acest punct de lucru este situat în domeniul în care funcţionarea ajutajului convergent de spălare are loc în regim critic în secţiunea minimă. Presiunea din aval de ajutajul convergent de spălare se poate considera practic egală cu presiunea gazului din interiorul sacului respirator iar, datorită faptului că spălarea cu oxigen a sacului se efectuează înainte de pătrunderea scafandrului sub apă, presiunea p_s poate fi considerată ca fiind practic egală cu presiunea atmosferică. Valoarea debitului masic de oxigen, $Q_{m,O2}$, injectat prin ajutajul convergent de spălare, în regim permanent, pe întreaga perioadă de spălare, este dată de relaţia (5-52) specifică curgerii adiabatice reversibile (izentropice).

Ajutajul convergent de compensare, lucrând în secţiunea sa minimă, pe primul interval al timpului de compensare în regim critic şi în cel de-al doilea interval de timp în regim subsonic (subcritic), asigură injectarea unui debit masic de oxigen pentru compensare, controlat pe întregul timp de compensare, din compartimentul inferior al capsulei 13, unde se află oxigen la presiunea constantă p_0, practic egală cu presiunea oxigenului de după regulatorul de presiune pilotat 3, către compartimentul superior al capsulei 13 în care se află gaz la o presiune p_e, care creşte pe măsura creşterii masei de gaz din interior datorită injecţiei de oxigen. Timpul de compensare este egal cu timpul de spălare. Timpul de compensare se calculează folosind grupul de expresii prezentate în figura 5.9, care au la bază relaţiile specifice curgerii adiabatice reversibile (izentropice) pentru ajutajul convergent şi ecuaţia de stare caracteristică gazelor perfecte pentru compartimentul superior al capsulei 13.

Prin realizarea aparatului de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen, de concepţie originală prezentat mai sus, se obţin următoarele avantaje:

– asigurarea unei spălări automate şi eficiente a sacului respirator înainte de efectuarea scufundării, eliminând orice risc de apariţie a hipoxiei şi eliminând, totodată, factorii subiectivi;

– securitatea crescută a scafandrului în timpul scufundării;

– punerea rapidă în condiţii de lucru a aparatului în vederea efectuării scufundării.

În figura 5.11 este prezentată realizarea practică a dispozitivului de spălare, precum şi schema lui de principiu. Notaţiile reperelor coincid cu cele prezentate în schema de principiu a aparatului de respirat sub apă în circuit închis cu oxigen (fig. 5.10).

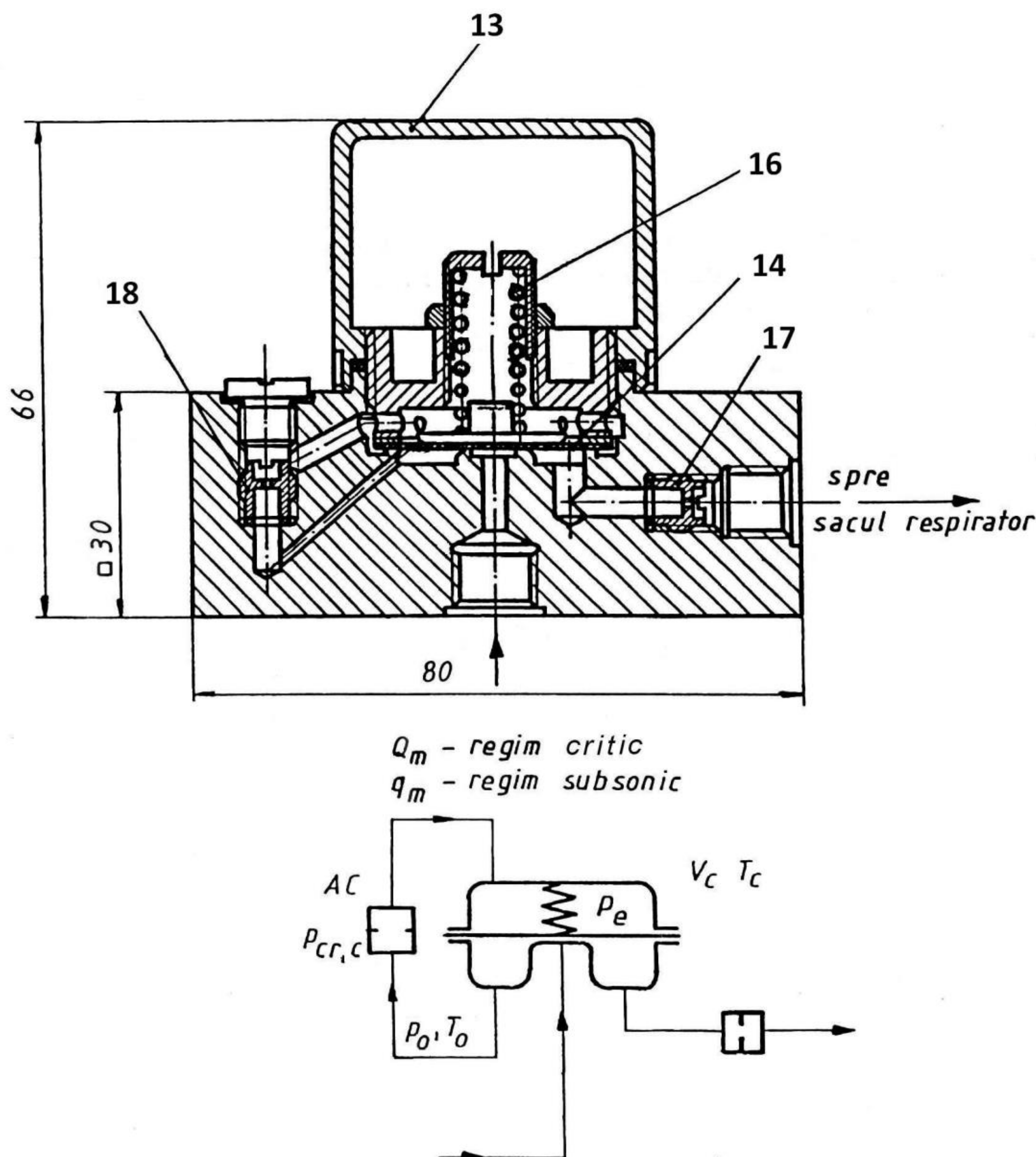


Fig. 5.11. Dispozitivul de spălare a sacului respirator şi schema de principiu: 13 – capsulă; 14 – membrană elastică; 16 – resort; 17 – ajutaj de injecţie; 18 – ajutaj de compensare.

5.3.1.2. Calculul gazodinamic al circuitelor aferente aparatului de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen

Calculul gazodinamic al circuitelor aferente aparatului de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen, conform schemei de principiu prezentată în figura 5.10, cuprinde trei etape:

– calculul debitului masic de oxigen injectat în sacul respirator, funcţie de diametrul ajutajului convergent de spălare;

– calculul volumului de oxigen necesar pentru spălarea sacului respirator şi stabilirea debitului maxim de oxigen necesar funcţie de timpul optim de spălare a acestuia;

– calculul diametrului minim al ajutajului convergent de compensare, funcţie de timpul optim de spălare a sacului respirator.

Rezolvarea expresiilor matematice de calcul pentru procesele gazodinamice aferente aparatului de respirat sub apă în circuit închis, a permis definirea următoarelor elemente constructive ale acestuia: diametrul minim al ajutajului convergent de injecţie 17 a oxigenului necesar pentru spălarea sacului respirator şi diametrul minim al ajutajului convergent de compensare 18, care are rolul de a opri injecţia de oxigen.

a) *Calculul debitului masic de oxigen injectat în sacul respirator*

Calculul debitului masic de oxigen injectat în sacul respirator s-a efectuat pentru diferite diametre minime d_1 ale ajutajului convergent de spălare, diametre cuprinse între 0,1 şi 1,5 mm, cu pasul de 0,1 mm. Pentru calcule s-au folosit următoarele relaţii:

$$Q_{mO_2,i} = A_1 \left(\frac{2}{k_{O_2}+1} \right)^{\frac{1}{k_{O_2}-1}} \sqrt{\frac{2k_{O_2}}{k_{O_2}+1}} \frac{p_0 \cdot 10^5}{\sqrt{R_{O_2} T_0}}, \tag{5-61}$$

$$Q_{O_2,i} = \frac{Q_{mO_2,i}\ R_{O_2}}{0,005685}\ ; \tag{5-62}$$

unde: $Q_{mO_2,i}$ este debitul masic de oxigen injectat [kg/s], $Q_{O_2,i}$ debitul volumic de oxigen injectat [N1/min], A_1 aria secţiunii minime a ajutajului de injecţie [m^2], k_{O_2} coeficientul adiabatic (izentropic) pentru oxigen $k_{O_2} = c_{pO_2} / c_{vO_2} = 919/659 = 1,394$ (tab. 5.1), p_0 presiunea oxigenului la intrarea în ajutajul de injecţie [bar (sc. abs.)], R_{O_2} constanta oxigenului $R_{O_2} = 260$ J/(kg·K) (tab. 5.1), iar T_{O_2} temperatura absolută la intrarea în ajutaj [^{o}K].

Diametrul şi aria secţiunii minime a ajutajului, d_1 [mm] şi A_1 [m^2] se vor calcula cu relaţiile $d_1 = 1128,379\sqrt{A_1}$ şi $A_1 = 7,85 \cdot 10^{-7} d_1^2$.

În legătură cu stabilirea valorii presiunii oxigenului la intrarea în ajutajul de injecţie pentru spălarea sacului respirator, s-a ţinut cont de faptul că priza de oxigen, conform schemei de principiu (fig. 5.10) este după reductorul de presiune pilotat 3, care alimentează şi regulatorul de presiune treapta a doua 4 a sacului respirator. Pentru buna funcţionare a regulatorului de presiune treapta a doua, care livrează "la cerere"

oxigen scafandrului, presiunea de alimentare este cuprinsă între 9 şi 12 bar (sc. abs.). Aceste presiuni au trebuit să fie luate în calcul şi pentru ajutajul de injecţie masică a circuitului de spălare a sacului respirator.

Ţinând cont de faptul că, pentru diametre mici ale ajutajului convergent (sub 2 mm), variaţiile de debit masic funcţie de temperatura gazului la intrarea în ajutaj sunt neglijabile, s-a adoptat, pentru calcule, o temperatură medie de 283,16 K.

Înlocuind datele prezentate mai sus în relaţiile 5-61 şi respectiv 5-62 se obţine relaţia de calcul a debitului volumic de oxigen injectat în sacul respirator funcţie de presiunea p_0, de la intrarea oxigenului în ajutaj şi diametrul minim d_1, al ajutajului convergent:

$$Q_{O_2,i} = 8{,}383\, d_1^2\, p_0 \quad \text{[Nl/min] sau [}l\text{N/min]} \qquad (5\text{-}63)$$

Rezultatele calculelor efectuate pentru diferite diametre d_1 cuprinse între 0,1 şi 1,5 mm şi pentru presiunile de intrare ale oxigenului în ajutaj de $p_0 = 9, 10, 11$ şi 12 bar (sc. abs.), sunt prezentate grafic în figura 5.12.

Pentru efectuarea de determinări experimentale în vederea verificării rezultatelor teoretice, a fost proiectat, executat şi echipat un stand pentru testarea ajutajelor de injecţie la debit masic blocat. La conceperea standului s-a pornit de la ideea simulării în totalitate a fenomenului corespunzător ajutajului aferent aparatului de respirat sub apă cu oxigen propriu-zis şi anume, urmărirea complexă a regimului de injecţie masică, la diferite presiuni de alimentare p_0 şi la diferite presiuni din aval de ajutaj p_e, cu simularea scufundării la adâncimile corespunzătoare de lucru ale aparatului.

Schema de principiu a standului este prezentată în figura 5.13. Acesta se compune din următoarele elemente principale: un sistem de alimentare format din butelii de stocare a gazelor la presiune înaltă 1, reductor de presiune 2, rezervor tampon cu volumul de 1 litru 3, robinet de reglaj 4 în amonte de blocul de injecţie masică 5 în care a fost amplasat ajutajul de testare 6. Instalaţia este completată cu două manometre de control al presiunii, unul în amonte 7 de duza de injecţie şi unul în aval 8. Robinetele de reglaj 9, plasate în amonte de rotametrul 10, permit stabilirea unei anumite presiuni p_e în aval de ajutaj.

Buteliile de stocaj 1 furnizează oxigen sau amestec respirator către instalaţia de testare. Prin intermediul reductorului de presiune 2 şi a robinetului de reglaj din amonte 4, se reglează şi se menţine presiunea de alimentare a ajutajului p_0 la valoarea dorită. Această presiune este indicată de manometrul din amonte 7, iar operatorul urmăreşte ca pe perioada unei determinări experimentale, presiunea p_0 să rămână constantă. Astfel, ajutajul convergent 6, care trebuie testat este alimentat cu oxigen sau amestec la presiunea p_0 controlată. Prin intermediul robinetelor de reglaj din aval 9 se stabileşte presiunea din aval de ajutajul testat p_e, care este indicată de manometrul din aval 8. Debitul de oxigen sau de amestec gazos care se stabileşte prin ajutajul testat,

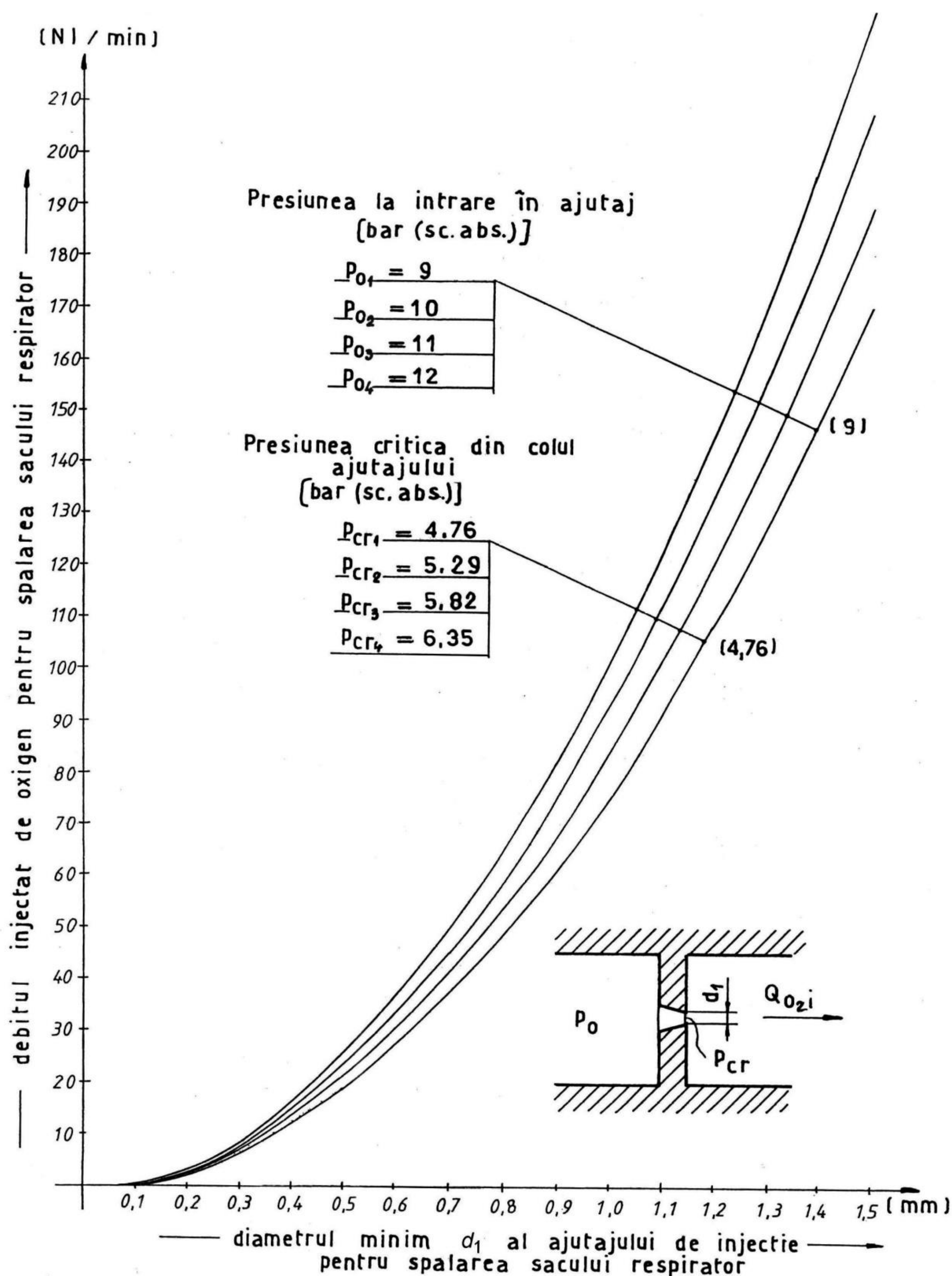


Fig. 5.12. Variaţia debitului de oxigen injectat $Q_{O_2,i}$ în sacul respirator funcţie de diametrul minim al ajutajului d_1, la diferite presiuni p_0 din amonte de acesta.

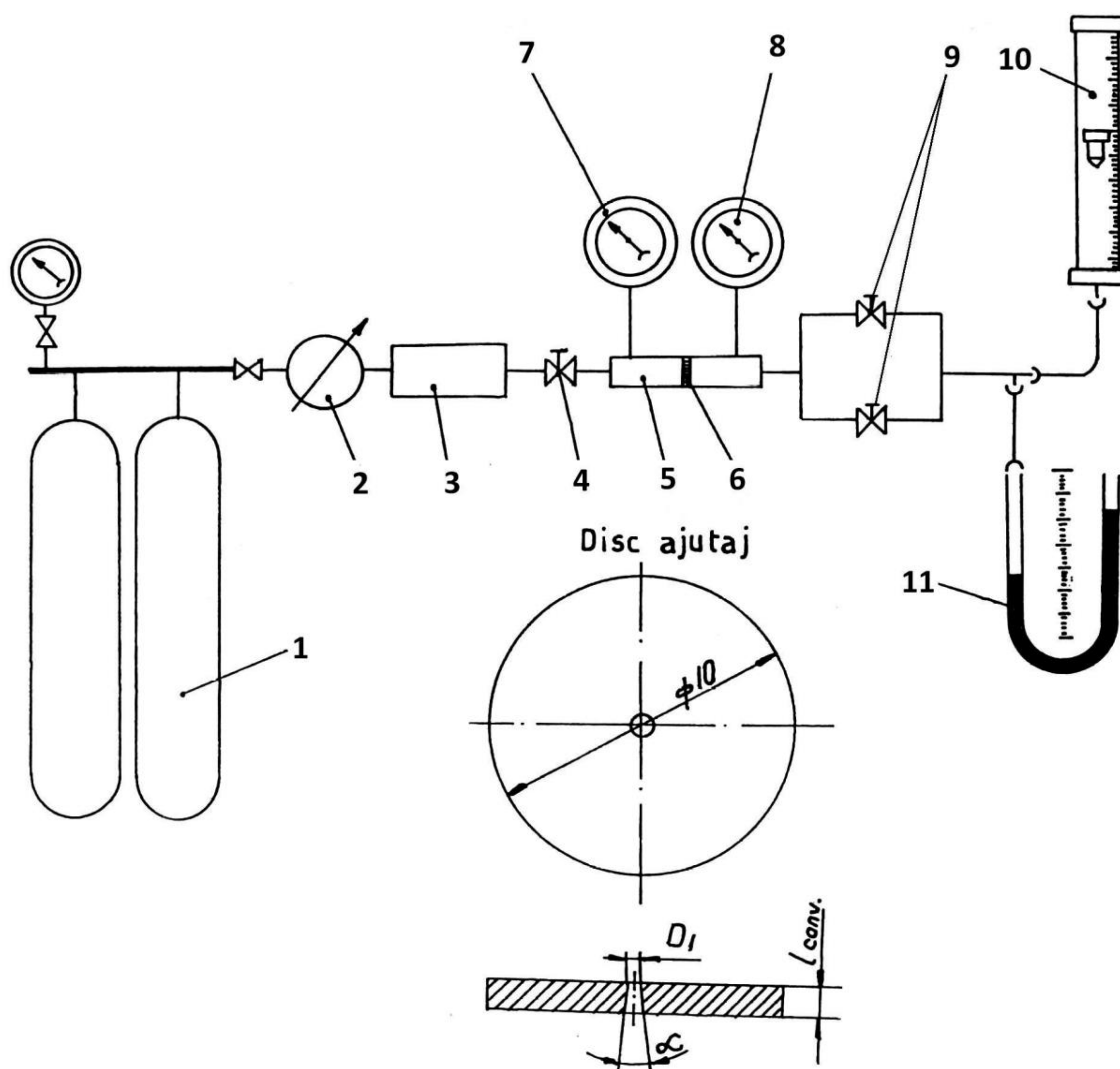


Fig. 5.13. Schema de principiu a standului de verificare a ajutajelor de injecţie: 1 – butelii de stocaj amestec respirator; 2 – reductor de presiune; 3 – rezervor tampon; 4 – robinet de reglaj; 5 – bloc de injecţie masică; 6 – ajutaj pentru testare; 7 - manometru amonte; 8 – manometru aval; 9 – robinete de reglaj; 10 – rotametru; 11 – manometru diferenţial.

corespunzător presiunilor p_0 şi p_e, se măsoară la debitmetrul de tip rotametru 10, cu evacuarea direct în atmosferă. Cu ajutorul manometrului diferenţial 11, tub "U" cu apă, s-a măsurat presiunea gazului înainte de rotametru, în scopul efectuării unor eventuale corecţii, cunoscut fiind faptul că rotametrul este etalonat pentru aer la 760 torr şi 20 °C.

Rezultatele determinărilor experimentale sunt prezentate în paragraful următor.

b) *Calculul volumului de oxigen necesar pentru spălarea sacului respirator*

La punerea în funcţiune a aparatului de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen, în sacul respirator şi în circuitele aferente (cartuşe filtrante de dioxid de carbon, tubulaturi, furtunuri şi racorduri) se află aer la presiunea atmosferică.

Concentraţia azotului este aproximativ 80% şi, dacă nu se execută spălarea acestor circuite, dat fiind faptul că aparatul funcţionează în circuit închis şi cu debit de oxigen "la cerere", cantitatea de azot din circuitele aferente aparatului devine suficient de mare (mai mare decât volumul curent respirator al scafandrului), astfel încât detentorul treapta a doua 4 a sacului respirator (fig. 5.10) să nu mai poată fi acţionat (acesta acţionează la realizarea unei depresiuni în sacul respirator de 3…5 cmH_2O). În acest caz, scafandrul riscă o criză hipoxică cu pierderea instantanee a cunoştinţei şi moartea prin înec. Din acest motiv, azotul existent în circuitele aparatului este considerat gaz poluant.

În general, debitul de ventilaţie a unei incinte se determină din bilanţul nocivităţilor. Ecuaţia diferenţială de bilanţ este:

$$\left(QY_r + \Sigma Y - QY\right)\mathrm{d}t = V\,\mathrm{d}Y \tag{5-64}$$

unde: Q este debitul volumic de gaz refulat, respectiv evacuat în şi respectiv din incintă [m^3/s], ΣY debitul masic total de substanţă nocivă degajată în incintă [kg/s], Y_r concentraţia gazului nociv în gazul refulat [kg/m^3], Y concentraţia aceleiaşi substanţe în gazul incintei, variabilă în timp [kg/m^3], t timpul [s], V volumul incintei [m^3].

Deoarece:

$$\mathrm{d}\left(QY_r + \Sigma Y - QY\right) = -Q\,\mathrm{d}Y,$$

relaţia 5-64 poate fi scrisă sub forma:

$$\frac{\mathrm{d}t}{V} = -\frac{1}{Q}\,\frac{\mathrm{d}\left(QY_r + \Sigma Y - QY\right)}{QY_r + \Sigma Y - QY}. \tag{5-65}$$

Integrând expresia 5-65 între momentul $t = 0$ (i – iniţial) şi momentul t (f - final) se obţine:

$$e^{\frac{Qt}{V}} = \frac{Q\left(Y_i - Y_r\right) - \Sigma Y}{Q\left(Y_f - Y_r\right) - \Sigma Y}, \tag{5-66}$$

unde: Y_i este concentraţia iniţială a substanţei nocive din incintă la timpul $t = 0$, Y_f concentraţia finală după timpul t.

În cazul studiat: $\Sigma Y = 0$ şi $Y_r = 0$, iar relaţia 5-66 devine:

$$Y_f = Y_i\,e^{-\frac{Qt}{V}}. \tag{5-67}$$

Cu ajutorul relaţiei 5-67, pentru $Y_i = 80\%$, s-au determinat variaţiile în timp ale concentraţiei azotului din diferiţi saci respiratori, cu volume de 3, 4, 5 şi 6 l, funcţie de diferite debite volumice de oxigen injectate. Rezultatele sunt prezentate grafic în figurile 5.14, 5.15, 5.16 şi 5.17.

Fig. 5.14. Variaţiile compoziţiei amestecului gazos, funcţie de timp, într-un sac respirator cu volumul de 3 *l*, la diferite debite volumice de oxigen injectate în sac.

La sfârşitul celor 15 secunde de spălare a sacului respirator se obţin parametrii în tabelul 5.4 şi timpul cu care este redusă autonomia de scufundare.

Tabelul 5.4

Caracteristicile amestecului gazos dintr-un sac respirator cu volumul de 3 *l*, după spălare cu oxigen la diferite debite, timp de 15 secunde şi reducerea autonomiei

Caracteristici	Debit de oxigen injectat [N1/min]				
	40	50	60	70	80
Concentraţia de N_2 la sfârşitul spălării [%]	2,86	1,24	0,54	0,23	0.21
Volumul de azot rămas în sacul respirator [1]	0,086	0,037	0,016	0,007	0,006
Volumul de oxigen consumat pentru spălare [1]	10	12,5	15	17,5	20
Reducerea autonomiei aparatului prin spălare cu O_2 [min]	5	6,25	7,5	8,75	10

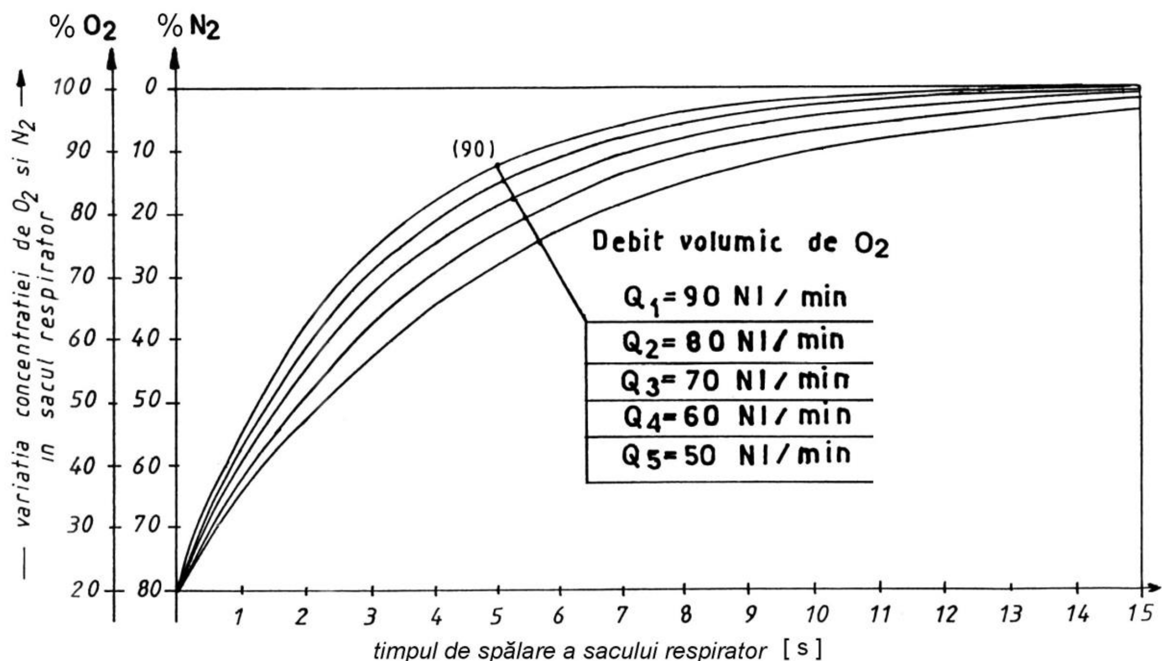


Fig. 5.15. Variaţiile compoziţiei amestecului gazos, funcţie de timp, într-un sac respirator cu volumul de 4 *l*, la diferite debite volumice de oxigen injectate în sac.

La sfârşitul celor 15 secunde de spălare a sacului respirator se obţin parametrii prezentaţi în tabelul 5.5 şi timpul cu care este redusă autonomia de scufundare.

Tabelul 5.5

Caracteristicile amestecului gazos dintr-un sac respirator cu volumul de 4 *l*, după spălare cu oxigen, la diferite debite, timp de 15 secunde şi reducerea autonomiei

Caracteristici	Debit de oxigen injectat [Nl/min]				
	50	60	70	80	90
Concentraţia de N_2 la sfârşitul spălării [%]	3,53	1,90	1,00	0,54	0,30
Volumul de azot rămas în sacul respirator [1]	0,14	0,076	0,040	0,022	0,012
Volumul de oxigen consumat pentru spălare [1]	12,5	15	17,5	20	22,5
Reducerea autonomiei aparatului prin spălare cu O_2 [min]	6,25	7,5	8,75	10	11,25

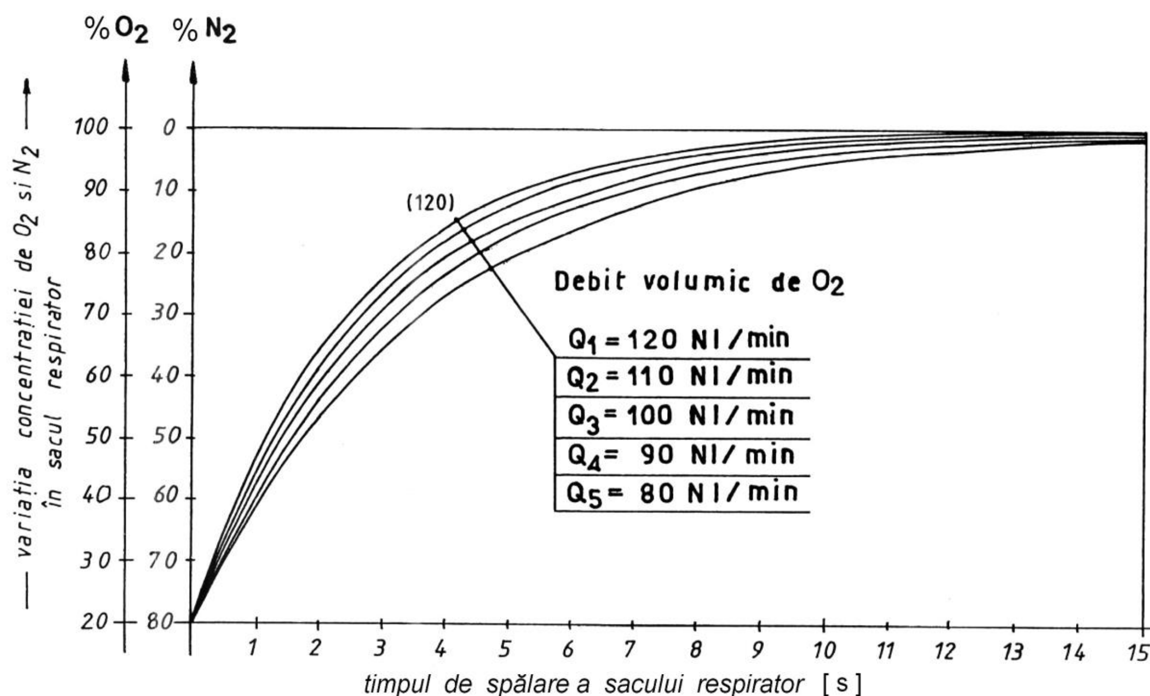


Fig. 5.16. Variaţiile compoziţiei amestecului gazos, funcţie de timp, într-un sac respirator cu volumul de 5 *l*, la diferite debite volumice de oxigen injectate în sac.

La sfârşitul celor 15 secunde de spălare a sacului respirator se obţin parametrii prezentaţi în tabelul 5.6 şi timpul cu care este redusă autonomia de scufundare.

Tabelul 5.6

Caracteristicile amestecului gazos dintr-un sac respirator cu volumul de 5 *l*, după spălare cu oxigen, la diferite debite, timp de 15 secunde şi reducerea autonomiei

Caracteristici	Debit de oxigen injectat [Nl/min]				
	80	90	100	110	120
Concentraţia de N_2 la sfârşitul spălării	1,46	0,90	0,54	0,33	0,20
Volumul de azot rămas în sacul respirator [l]	0,073	0,045	0,027	0,017	0,010
Volumul de oxigen consumat pentru spălare [l]	20	22,5	25	27,5	30
Reducerea autonomiei aparatului prin spălare cu O_2 [min]	10	11,25	12,5	13,75	15

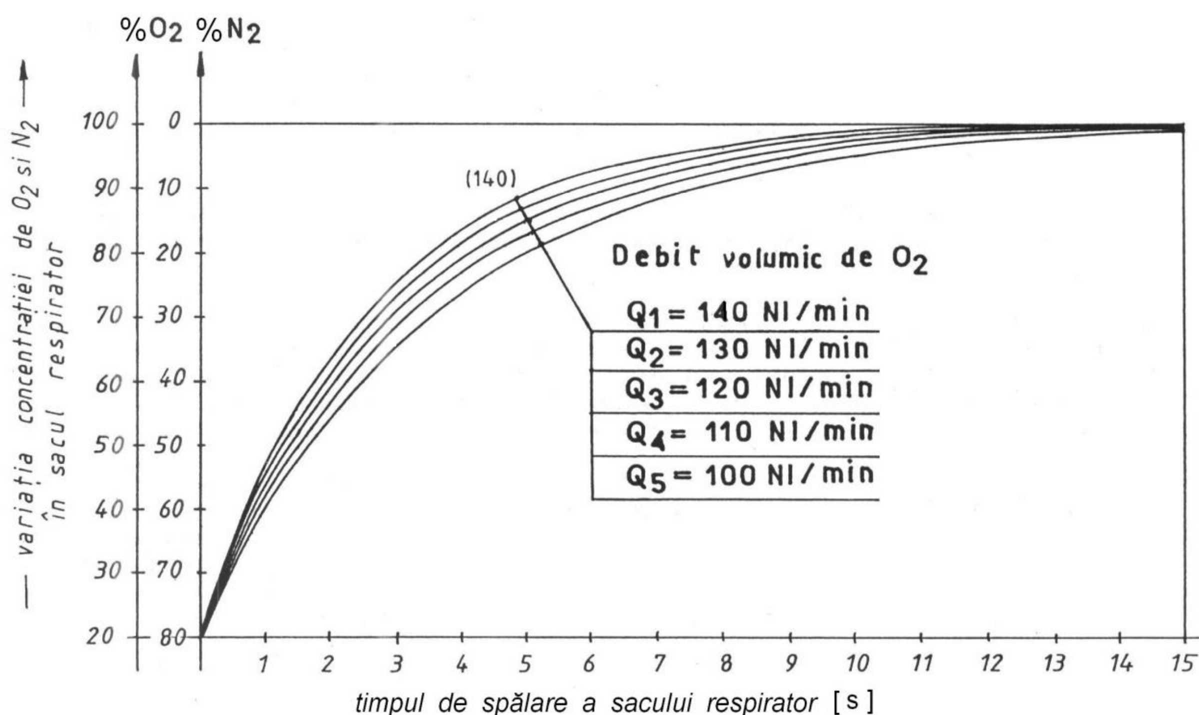


Fig. 5.17. Variaţiile compoziţiei amestecului gazos, funcţie de timp, într-un sac respirator cu volumul de 6 *l*, la diferite debite volumice de oxigen injectate în sac.

La sfârşitul celor 15 secunde de spălare a sacului respirator se obţin parametrii prezentaţi în tabelul 5.7 şi timpul cu care este redusă autonomia de scufundare.

Tabelul 5.7

Caracteristicile amestecului gazos dintr-un sac respirator cu volumul de 6 *l*, după spălare cu oxigen, la diferite debite, timp de 15 secunde şi reducerea autonomiei

Caracteristici	Debit de oxigen injectat [Nl/min]				
	100	110	120	130	140
Concentraţia de N_2 la sfârşitul spălării	1,24	0,81	0,54	0,36	0,23
Volumul de azot rămas în sacul respirator [1]	0,074	0,048	0,032	0,022	0,014
Volumul de oxigen consumat pentru spălare [1]	25	27,5	30	32,5	35
Reducerea autonomiei aparatului prin spălare cu O_2 [min]	12,5	13,75	15	16,25	17,5

Pentru calculul timpului pierdut din autonomia aparatului de respirat sub apă datorată spălării sacului respirator, s-a considerat un consum maximal de oxigen al utilizatorului de 2 l/min.

Din analiza datelor prezentate în tabelele 5.4 … 5.7 şi din figura 5.12 se pot defini următoarele:

– timpul de 15 secunde necesar pentru spălarea sacului respirator este un timp tehnologic acceptabil, mai mic decât în cazul spălării prin manevre "manuale" a acestuia;

– un debit de 100 Nl/min de oxigen injectat în sacul respirator, timp de 15 secunde, acoperă toate variantele constructive pentru sacul respirator (3 … 6 l). Adoptarea acestui debit pentru toate variantele constructive ale sacului respirator are avantajul unei soluţii unice, inconfundabile, ce conferă securitatea necesară utilizatorului;

– pierderea, din autonomia aparatului de respirat sub apă a unui timp, de 12,5 minute reprezintă 7% din întrega lui autonomie, pierdere ce nu trebuie luată în considerare, ţinând cont de faptul că şi în varianta clasică, fără dispozitivul automat, spălarea se execută "manual" prin 4 …5 manevre succesive de umplere cu oxigen şi golire a sacului respirator;

– intrând cu debitul necesar pentru spălarea sacului respirator în graficul din figura 5.12 s-a determinat că o duză cu diametrul minim de 1,1 mm satisface cerinţele de spălare a sacului aferent aparatului de respirat sub apă în circuit închis cu oxigen.

Având definite elementele principale, presiunile de alimentare şi timpul necesar pentru spălarea sacului respirator, s-a putut la cea de-a treia etapă a calculului gazodinamic al circuitelor aferente aparatului de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen.

c) *Calculul diametrului minim al ajutajului convergent de compensare*

Pentru calculul diametrului minim al ajutajului convergent de compensare s-a plecat de la relaţiile prezentate în figura 5.9. Expresia diametrului minim al ajutajului de compensare este:

$$d_1 = 1128{,}379\sqrt{A_1} \quad [d_1\,\mathrm{mm}], \tag{5-68}$$

unde: A_1 este secţiunea minimă a ajutajului [m^2];

$$A_1 = E\left(G+F\right),$$

unde:

$$E = \frac{V_c 10^{-6}}{R_{aer}\ T_c\ t_c \sqrt{\dfrac{2k_{Ox}}{k_{Ox}-1}\ \dfrac{1}{R_{Ox} T_0}}}, \tag{5-69}$$

$$G = \frac{1}{\left(\dfrac{2}{k_{Ox}+1}\right)^{\frac{1}{k_{Ox}-1}} \sqrt{\dfrac{k_{Ox}-1}{k_{Ox}+1}}} \left(\frac{p_{cr,c}}{p_0} - \frac{p_{at}}{p_0}\right), \tag{5-70}$$

$$F=\int_{\frac{p_{cr,c}}{p_0}}^{\frac{p_f}{p_0}}\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{\frac{2}{k_{Ox}}}-\left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{\frac{k_{Ox}+1}{k_{Ox}}}}}\,\mathrm{d}\left(\frac{p_c}{p_0}\right). \tag{5-71}$$

Pentru cazul studiat datele de calcul sunt: volumul camerei superioare a dispozitivului de spălare, rezultat din proiectare $V_c = 36,557\ \text{cm}^3$ (fig. 5.11), constanta aerului $R_{aer} = 288,59\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$, temperatura medie în compartimentul superior al mecanismului de spălare $T_c = 288{,}16\ \text{K}$, timpul de compensare egal cu timpul de spălare $t_c = 15\ \text{s}$, exponentul adiabatic (izentropic) pentru oxigen $k_{ox} = 1,394$ şi temperatura medie în amonte de ajutajul convergent de compensare $T_0 = 288{,}16\,\text{K}$.

Cu aceste date se poate calcula E. Valoarea lui E conform relaţiei 5-69 este:

$$E = 0,302\cdot 10^{-8}.$$

Pentru calculul lui G se folosesc următoarele date:

$$p_0 = 9\ \text{bar}\,(\text{sc. abs.}),$$

$$\frac{p_{cr,c}}{p_0}=\left(\frac{2}{k_{Ox}+1}\right)^{\frac{k_{Ox}}{k_{Ox}-1}}=0,529.$$

Înlocuind datele în relaţia 5-70 se obţine:

$$G = 1,628.$$

Pentru calculul lui F, singura dată care lipseşte este presiunea finală din compartimentul superior al mecanismului de spălare p_f care este egală cu 8,1 bar (sc. abs.). Această presiune este rezultatul acţiunii resortului clapetei de închidere a circuitului de spălare, care acţionează înainte de a se stabili presiunea p_0 şi în compartimentul superior al dispozitivului de spălare pe timpul scufundării, datorită faptului că scufundarea se execută în limitele 1 la 1,7 bar (sc. abs.), iar detentorul treapta întâi (fig. 5.10, poz. 4) lucrează pilotat de presiunea hidrostatică. Înlocuind datele în relaţia 5-71 se obţine:

$$F=\int_{0,529}^{0,9}\frac{\mathrm{d}\left(\frac{p_c}{p_0}\right)}{\sqrt{\left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{1,435}-\left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{1,717}}}. \tag{5-72}$$

Deoarece funcţia integrală este uniformă, continuă şi pozitivă în intervalul 0,529 … 0,9 se poate aplica o metodă aproximativă de integrare. Astfel, s-a aplicat metoda trapezelor, rezultând:

$$F = 1,674.$$

Se poate determina aria secţiunii minime a ajutajului de compensare folosind relaţia:

$$A_1 = E(G+F) = 0,302 \cdot 10^{-8}(1,628+1,674) = 0,997 \cdot 10^{-8} \text{ [m}^2\text{]}$$

de unde rezultă diametrul minim al ajutajului de compensare:

$$d_1 = 1128,379 \cdot \sqrt{0,997 \cdot 10^{-8}} = 0,112 \text{ [mm]}.$$

Astfel, toate elementele aparatului de respirat sub apă în circuit închis cu oxigen au fost dimensionate. Sacul respirator (fig. 5.10, poz. 5) poate fi ales, din punct de vedere constructiv, cu un volum cuprins între 3 şi 6 l, funcţie de dimensiunile aparatului şi modul de purtare. Pentru aparate purtate pe spate s-a ales varianta cu volum de sac respirator de 5 … 6 l, iar pentru varianta de purtare în faţă, varianta cu volum de sac respirator de 3 … 4 l. Cert este că, indiferent de dimensiunile sacului respirator, dispozitivul automat de spălare al acestuia are aceleaşi caracteristici. Reductorul de presiune treapta a doua (fig. 5.10, poz. 4), care alimentează "la cerere" scafandrul, este un reductor clasic, adaptat sacului respirator. Schema lui de principiu este prezentată în figura 5.18.

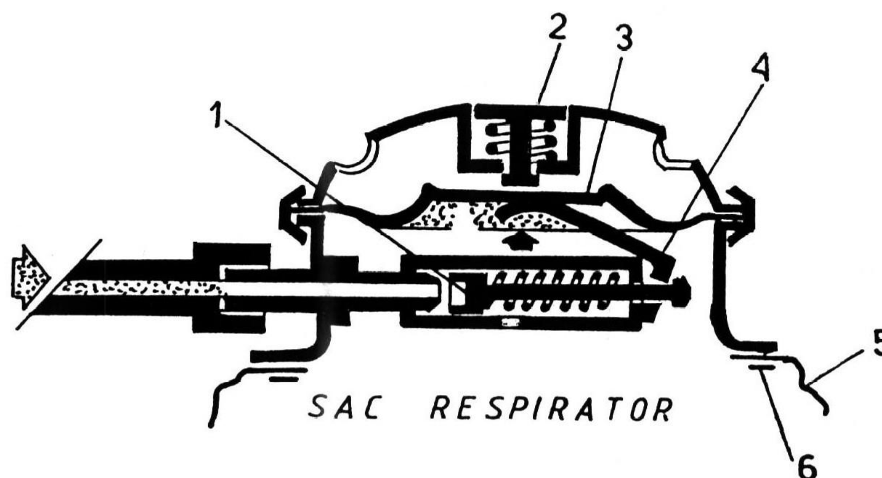


Fig. 5.18. Reductor de presiune treapta a doua pentru sacul respirator al aparatului de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen: 1 – piston clapet; 2 – buton de debit continuu; 3 – membrană; 4 – pârghie de acţionare a pistonului clapet; 5 – sac respirator; 6 – sistem de fixare a reductorului de sacul respirator.

Reductorul de presiune treapta întâi este, de asemenea, de tip clasic, utilizabil şi pentru aparatele de scufundare în circuit deschis cu aer comprimat. Schema reductorului treapta întâi este prezentată în figura 5.19. Acest reductor de presiune are posibilitatea să alimenteze două circuite la presiunea medie de 9 bar (sc. abs.), unul pentru reductorul treapta a doua a sacului respirator şi altul pentru circuitul de spălare. Reductorul mai dispune de o priză de înaltă presiune ce alimentează un manometru indicator al presiunii din butelia de stocare a oxigenului.

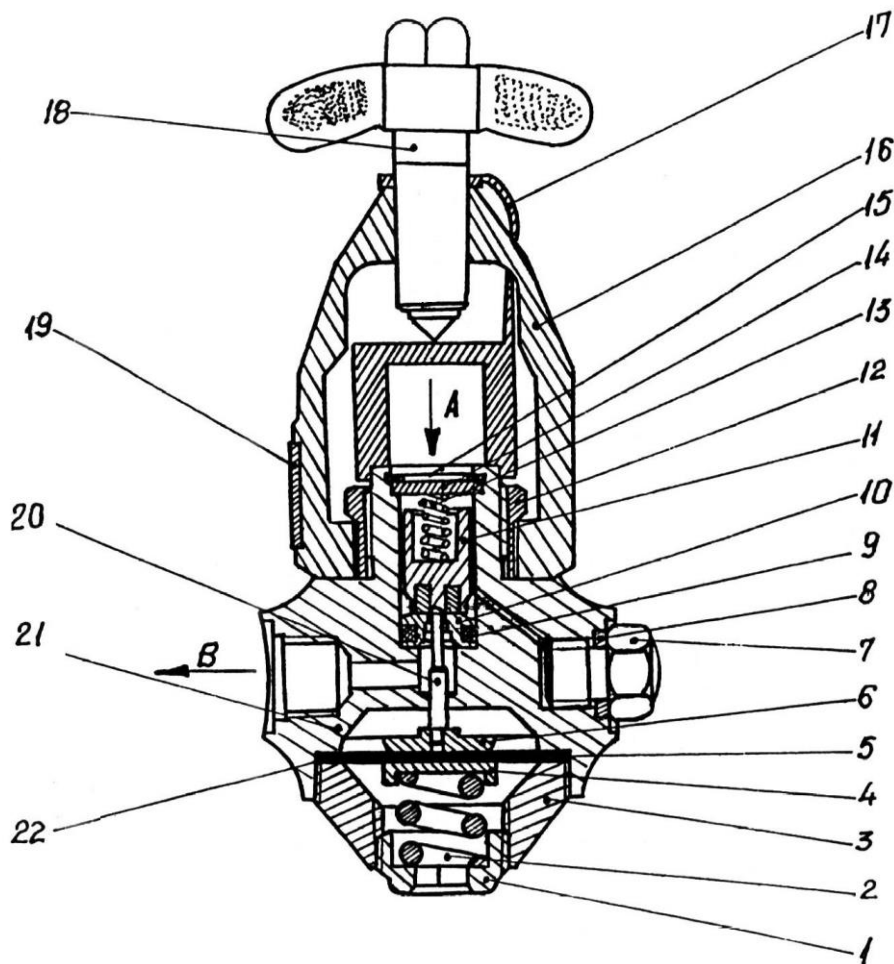


Fig. 5.19. Reductor de presiune treapta întâi: A – alimentare cu amestec de gaze la înaltă presiune; B – ieşire amestec de gaze la medie presiune (0 … 14 bar); 1 - şurub de reglare; 2 – resort de tarare; 3 – capac; 4 – taler resort; 5 – membrană; 6 - taler tijă; 7 – dop; 8, 9 – inele de etanşare; 10 – scaun supapă; 11 – clapet; 12 - iuliţă de fixare; 13 – resort clapet; 14 – filtru sinterizat; 15 – inel de siguranţă; 16 – jug de fixare pe butelie; 17 – dop de protecţie; 18 – şurub de fixare; 19 – placă de inscripţionare; 20 – tijă; 12 – corp detentor.

În concluzie, dispozitivul de spălare a sacului respirator prezentat în figura 5.10 se compune din două circuite, unul de spălare propriu-zisă, caracterizat de o presiune de alimentare de 9 bar (sc. abs.), cu un ajutaj de injecţie masică cu diametrul minim de 1,1 mm şi un circuit de compensare, prezentat în figura 5.11, caracterizat de o presiune de alimentare de 9 bar (sc. abs.) cu un ajutaj de injecţie cu diametrul minim de 0,112 mm.

Rezultatele calculelor matematice asupra gazodinamicii circuitelor aparatului de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen, au fost verificate experimental constatându-se o foarte bună suprapunere a datelor. Despre rezultatele experimentale efectuate se vor da detalii în cele ce urmează.

O schemă simplificată a aparatului de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen este prezentată, pentru comparare, în figura 5.20. Acest tip de aparat a fost printre primele aparate cu circuit închis cu oxigen proiectate, dar care nu și-a justificat,

ulterior, competitivitatea. Aparatul funcţionează cu debit continuu de oxigen injectat în sacul respirator, un debit care acoperă consumul maximal al scafandrului, consum ce poate varia între 2 şi 2,5 l/min. Aparatul oferă o bună securitate scafandrului, dar are dezavantajul unei pierderi însemnate în autonomie, de până la 60%. Acesta este principalul motiv pentru care s-a abandonat utilizarea acestui tip de aparat, deoarece scopurile militare în care este folosit necesită o autonomie maximă.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen se folosesc numai în scopuri militare şi sunt interzise pentru scufundări industriale, datorită pericolului crescut al apariţiei hiperoxiei la eforturi deosebite ale scafandrului.

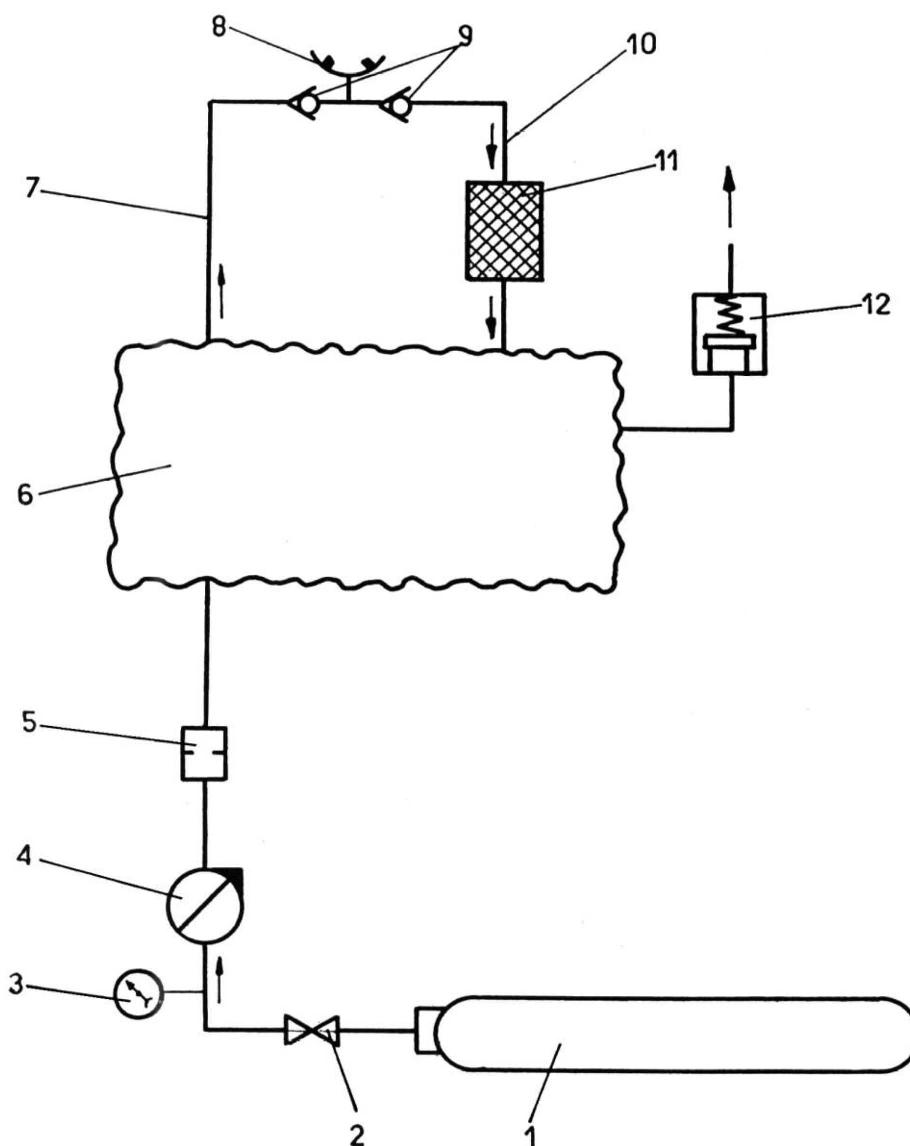


Fig. 5.20. Schema de principiu, simplificată, a aparatului de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen: 1 – butelie cu oxigen; 2 – robinet; 3 – manometru de control presiune; 4 – reductor de presiune; 5 – ajutaj de injecţie; 6 – sac respirator; 7 – furtun inspiraţie; 8 – muştiuc; 9 – bloc supape; 10 – furtun expiraţie; 11 – cartuş filtrant pentru dioxid de carbon; 12 – supapă de evacuare.

5.3.2. CONCEPŢIA ŞI CALCULUL APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS

În cazul aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis, reciclarea amestecului respirator se face parţial, deci o parte din gazul expirat de scafandru este eliminat în mediul ambiant, restul fiind trecut prin filtre epuratoare de dioxid de carbon. Presiunea parţială a oxigenului din amestecurile utilizate este menţinută în limitele de securitate, fără a se creşte prea mult presiunea parţială a gazului inert, care determină, de fapt, durata revenirii la presiunea atmosferică (timpul de decompresie).

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis trebuie să furnizeze, în mod automat, un amestec gazos în care concentraţia oxigenului să scadă cu creşterea adâncimii de scufundare, în aşa fel încât presiunea parţială a acestuia să rămână în limitele admisibile, sau un amestec gazos cu o concentraţie de oxigen pe o anumită gamă de adâncimi. În concluzie, este necesar ca la o adâncime dată, amestecul respirator să fie definitiv stabilit, indiferent de condiţia fizică a scafandrului care foloseşte aparatul, precum şi de activitatea sa sub apă (consum de oxigen funcţie de intensitatea muncii). Aceste elemente condiţionează adâncimea maximă de utilizare a aparatului precum şi procedeul de revenire la presiunea atmosferică.

Problema se complică prin faptul că volumul gazelor variază pe timpul schimbării adâncimilor. Funcţie de soluţiile adoptate pentru rezolvarea acestei probleme au fost puse la punct diferite aparate. Totuşi, aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis au o caracteristică comună: stabilitatea amestecului respirator este asigurată printr-o evacuare comună, în mediul ambiant, a unei cantităţi de gaz săracă în oxigen, evacuare compensată de un amestec nou, alimentat din buteliile de stocare.

În cadrul acestei categorii de aparate de respirat sub apă, specialiştii din Centrul de Scafandri Constanţa şi din Catedra de Hidraulică şi Protecţia Mediului din Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti, au pus la punct un aparat de respirat sub apă de mare autonomie care utilizează amestecuri gazoase supraoxigenate (NITROX şi HELIOX), prezentat în continuare atât din punct de vedere al concepţiei cât şi al calculului gazodinamic.

5.3.2.1. Concepţia aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis de mare autonomie

Studierea, proiectarea şi realizarea unui astfel de aparat de respirat sub apă de mare autonomie, în România, a apărut din necesitatea unor scufundări cu scop industrial sau militar, care să permită durate destul de mari de rezidenţă la adâncimea de lucru, asociate cu durate de decompresie cât mai scurte posibil, adică cu un randament al scufundării ridicat.

Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis studiat, este prezentată în figura 5.21. Aparatul este alcătuit din următoarele elemente componente principale:

– butelii de alimentare 1 încărcate la 200 bar, conţinând amestecuri gazoase supraoxigenate, care alimentează reductoarele de presiune nepilotat 2 şi pilotat 3;

– reductorul de presiune nepilotat 2 reduce presiunea de la nivelul presiunii înalte existente în butelii, la nivelul presiunii medii necesare alimentării ajutajului de injecţie masică 4. La ieşirea din reductor presiunea este constantă indiferent de adâncimea scufundării;

– sacul respirator 5 are rolul de a prelua variaţiile de volum şi presiune rezultate din respiraţie, de a aduce presiunea amestecului respirator din sac la nivelul presiunii corespunzătoare adâncimii de lucru, precum şi de a asigura stocarea cantităţii de amestec gazos necesară următoarei respiraţii;

– furtunul de expiraţie 6 şi furtunul de inspiraţie 7, care sunt racordate la piesa bucală 8, au rolul de a asigura expiraţia şi respectiv inspiraţia utilizatorului. Expiraţia se realizează prin intermediul furtunului 6 către sacul respirator, amestecul expirat trecând în prealabil prin cartuşele filtrante 9 pentru reţinerea dioxidului de carbon;

– supapa de evacuare 10 asigură evacuarea surplusului de amestec gazos din sacul respirator către mediul ambiant exterior în timpul imersiei, în timpul staţionării la adâncimea de lucru şi în timpul revenirii la presiunea atmosferică;

– reductorul de presiune pilotat 3, de tip treapta întâi, alimentează robinetul 12 şi regulatorul de presiune treapta a doua 11 cu amestec respirator din buteliile de stocare. Robinetul 12 are rolul de a asigura umplerea manuală a sacului respirator, în caz de necesitate, la momentul iniţial al ridicării spre presiunea atmosferică, iar reductorul de presiune treapta a doua 11 asigură, în caz de necesitate, alimentarea scafandrului direct din buteliile de stocare de amestec respirator. În acest ultim caz, scafandrul renunţă la piesa bucală 8 folosind muştiucul cu care este prevăzut reductorul de presiune treapta a doua 11;

– manometrul 3 asigură aprecierea continuă a autonomiei aparatului prin indicarea presiunii amestecului gazos din buteliile de stocare.

Aparatul de scufundare cu circuit semiînchis propus are la baza principiului de funcţionare, injecţia masică, prin care se realizează introducerea permanentă în sacul respirator 5 a unui debit masic din amestecul de gaze supraoxigenat stocat în buteliile de stocare 1. În acest fel, se acoperă deficitul de oxigen din sac, care ar rezulta prin consumarea acestuia de către scafandru. Deci, debitul de amestec injectat în sacul respirator conduce, în mod implicit, la injectarea unui debit de oxigen care să înlocuiască oxigenul consumat în cadrul proceselor metabolice. Cantitatea de oxigen care trebuie înlocuită (oxigenul consumat) reprezintă diferenţa dintre cantitatea de oxigen inspirat şi cantitatea de oxigen expirat. Debitul de amestec injectat în sacul respirator este considerabil mai mic decât debitul de amestec consumat cu un aparat de respirat sub apă cu circuit deschis utilizând acelaşi amestec, în aceleaşi condiţii de efort şi pentru aceeaşi adâncime de lucru. Aceasta deoarece o bună parte din oxigenul respirat este recuperată împreună cu cea mai mare parte din gazul inert prin trecerea amestecului gazos expirat, înainte de a intra în sacul respirator, prin cartuşul filtrant, reţinându-se în întregime dioxidul de carbon.

Surplusul de amestec gazos rezultat în sacul respirator va fi eliminat către exterior prin intermediul supapei de evacuare tarate 10.

Cantitatea de oxigen consumată de către scafandru este funcţie de categoria de efort depus în cadrul muncii efectuate. Rezultă, deci, că mărimea debitului de amestec injectat în sacul respirator va fi funcţie de activitatea depusă sub apă, astfel încât masa de oxigen injectată să fie cel puţin egală cu masa de oxigen consumată. În acest mod, în interiorul sacului respirator se obţine un amestec cu caracteristici mai mult sau mai puţin apropiate de cele ale amestecului injectat din butelii şi care, pentru o anumită categorie de activitate îşi menţine parametrii constanţi (participaţia volumică şi masică a oxigenului mai mică decât cea din amestecul injectat).

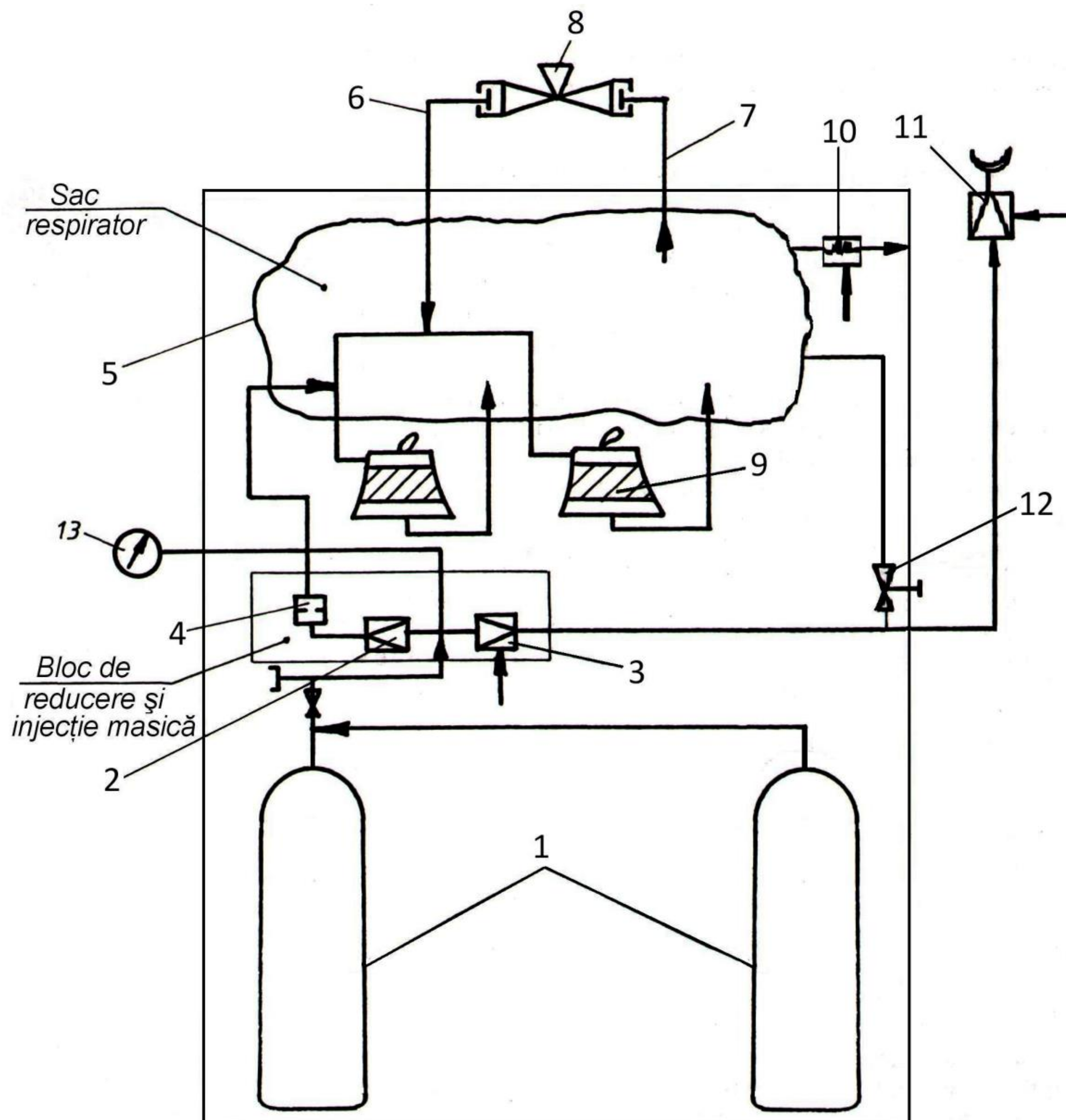


Fig. 5.21. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis: 1 – butelii stocare amestec respirator; 2 – reductor de presiune treapta întâi nepilotat; 3 – reductor de presiune treapta întâi pilotat; 4 – ajutaj de injecţie; 5 - sac respirator; 6 – furtun expiraţie; 7 – furtun inspiraţie; 8 – bloc supape muştiuc; 9 – filtre epuratoare de CO_2; 10 – supapă de evacuare; 11 – reductor de presiune treapta a doua; 12 – robinet de ventilare; 13 – manometru control presiune.

5.3.2.2. Calculul gazodinamic al circuitelor aferente aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis de mare autonomie

Calculul gazodinamic al circuitelor aferente aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis, conform schemei de principiu prezentată în figura 5.21, a avut două componente principale:

– calculul debitului masic de amesec gazos injectat în sacul respirator funcţie de diametrul minim al ajutajului convergent de injecţie; modelele matematice au fost efectuate pentru patru tipuri de amestecuri respiratorii NITROX şi anume 32,5; 40; 50 şi 60% oxigen;

– calculul parametrilor amestecului gazos din sacul respirator, funcţie de consumul de oxigen al scafandrului.

Rezolvarea modelelor matematice de calcul pentru procesele gazodinamice aferente aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis studiat, a permis definirea următoarelor elemente constructive determinante în funcţionarea aparatului: blocul de reducere şi injecţie masică şi sacul respirator (fig. 5.21). Analiza rezultatelor obţinute, teoretice şi experimentale, a permis definirea următoarelor caracteristici ale aparatului: adâncimea maximă de utilizare în deplină securitate pentru scafandru funcţie de amestecul respirator supraoxigenat din buteliile de stocare şi procedeul de revenire la presiunea atmosferică (decompresia).

a) *Calculul debitului masic de amestec gazos injectat în sacul respirator*

Calculul debitului masic de amestec gazos injectat în sacul respirator s-a efectuat pentru diferite diametre minime d_1 ale ajutajului convergent de injecţie, diametre cuprinse între 0,1 şi 0,8 mm, cu pasul de 0,01 mm. Pentru calcul s-au folosit următoarele relaţii:

$$Q_{ma,i} = A_1 \left(\frac{2}{k_a + 1} \right)^{\frac{1}{k_a - 1}} \sqrt{\frac{2k_a}{k_a + 1}} \frac{p_0 \cdot 10^5}{\sqrt{R_a T_0}} \qquad (5\text{-}73)$$

$$Q_{a,i} = \frac{Q_{ma,i} R_a}{0,005685} \qquad (5\text{-}74)$$

unde: $Q_{ma,i}$ este debitul masic de amestec gazos injectat [kg/s], $Q_{a,i}$ debitul volumic de amestec gazos injectat [N1/min], A_1 aria secţiunii minime a ajutajului injecţie [m^2], $d_1 = 1128,379\sqrt{A_1}$, diametrul secţiunii minime a ajutajului [mm], k_a coeficientul adiabatic (izentropic) specific amestecului utilizat (aceşti coeficienţi sunt prezentaţi în tabelul 5.2), p_0 presiunea amestecului gazos la intrarea în ajutajul de injecţie [bar (sc. abs.)], T_0 temperatura absolută a gazului la intrarea în ajutaj [K].

Calculul debitului de amestec a fost efectuat cu ajutorul unui program de calcul, conform schemei logice simplificate prezentată în figura 5.22, iar rezultatele sunt prezentate sub forma grafică în figura 5.23 pentru amestec NITROX 32,5/67,5 (32,5% oxigen şi 67,5% azot), în figura 5.24 pentru amestec NITROX 40/60, în figura 5.25 pentru amestec NITROX 50/50 şi în figura 5.26 pentru amestec NITROX 60/40. Participaţiile volumice r ale compnentelor celor patru amestecuri NITROX sunt: $r_{O_2} = 0,325$ şi $r_{N_2} = 0,675$ pentru NITROX 32,5/67,5, $r_{O_2} = 0,40$ şi $r_{N_2} = 0,60$ pentru NITROX 40/60, $r_{O_2} = 0,50$ şi $r_{N_2} = 0,50$ pentru NITROX 50/50 şi $r_{O_2} = 0,60$ şi $r_{N_2} = 0,40$ pentru NITROX 60/40.

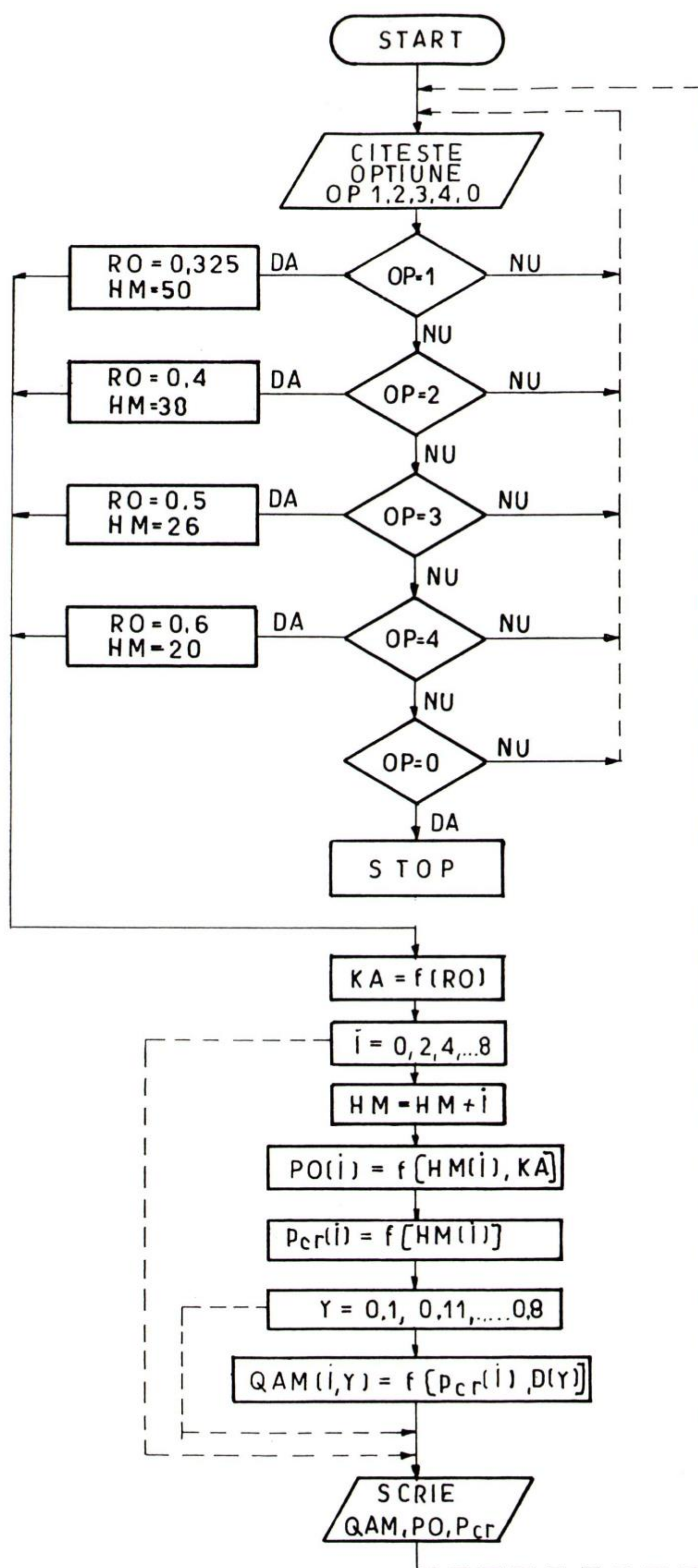


Fig. 5.22. Schema logică simplificată pentru calculul debitului de amestec gazos injectat în sacul respirator.

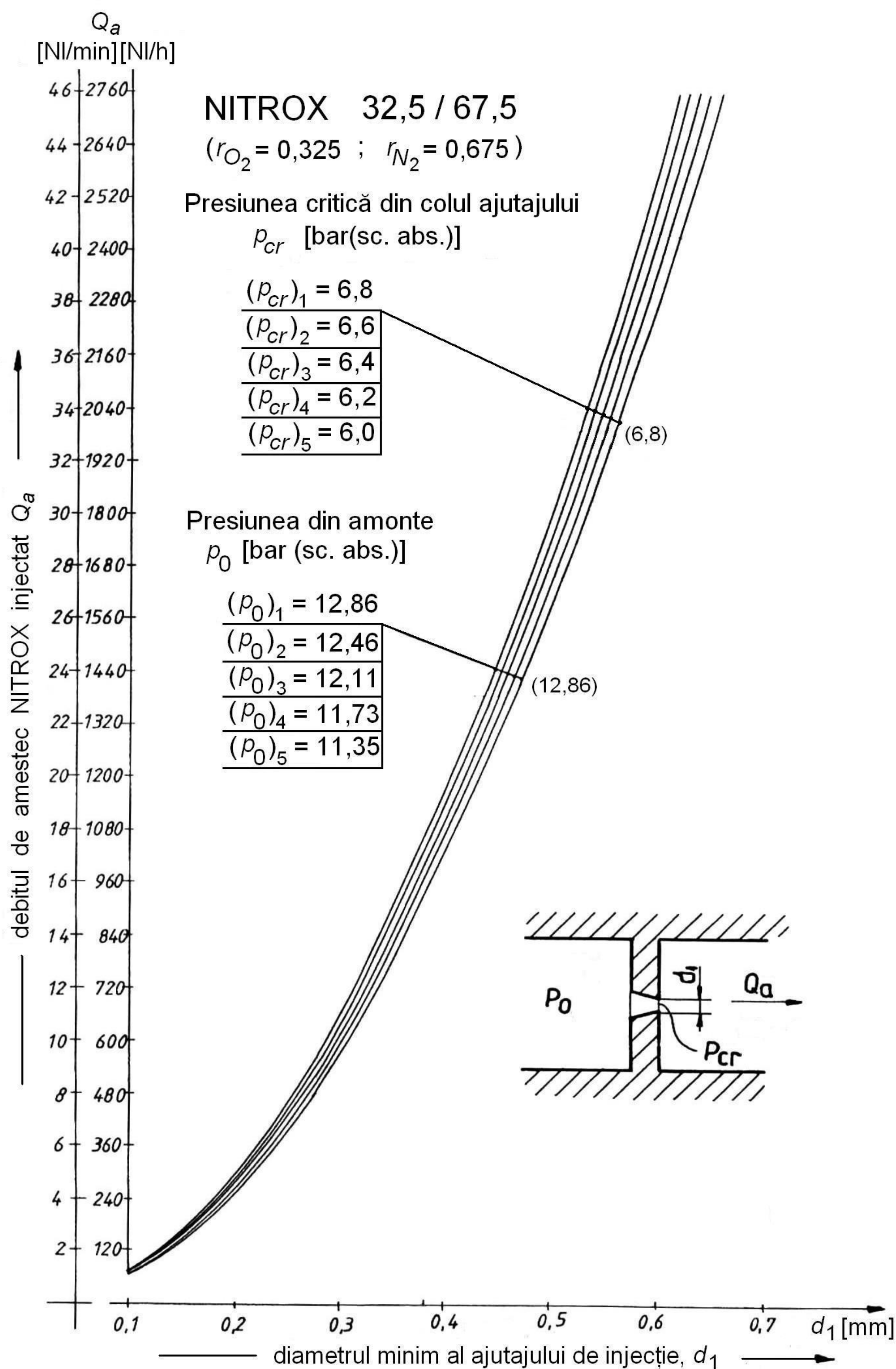


Fig. 5.23. Variaţia debitului Q_a de amestec NITROX 32,5/67,5 funcţie de diametrul minim al ajutajului d_1, la diferite presiuni de alimentare p_0.

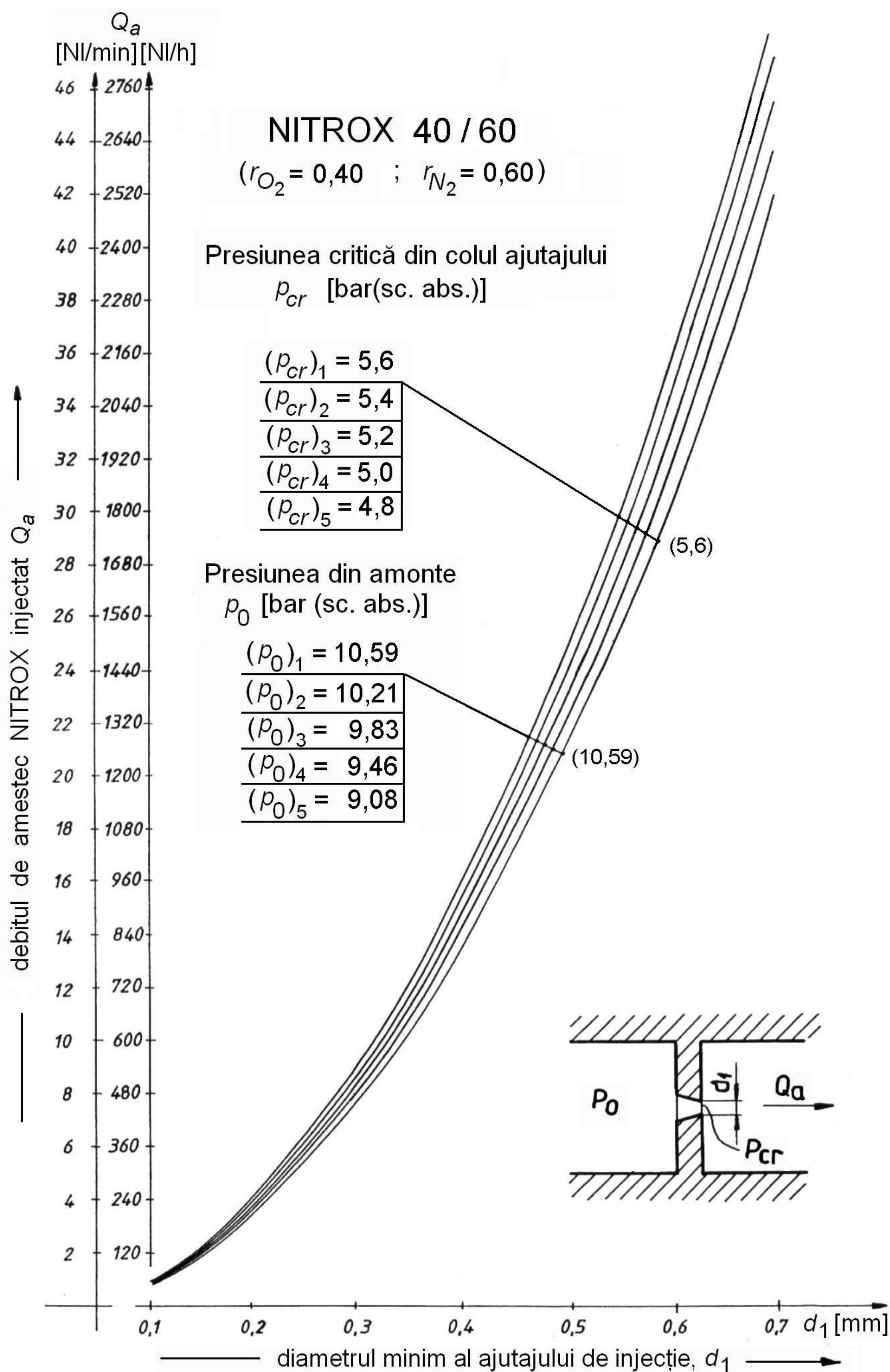


Fig. 5.24. Variaţia debitului Q_a de amestec NITROX 40/60 funcţie de diametrul minim al ajutajului d_1, la diferite presiuni de alimentare p_0.

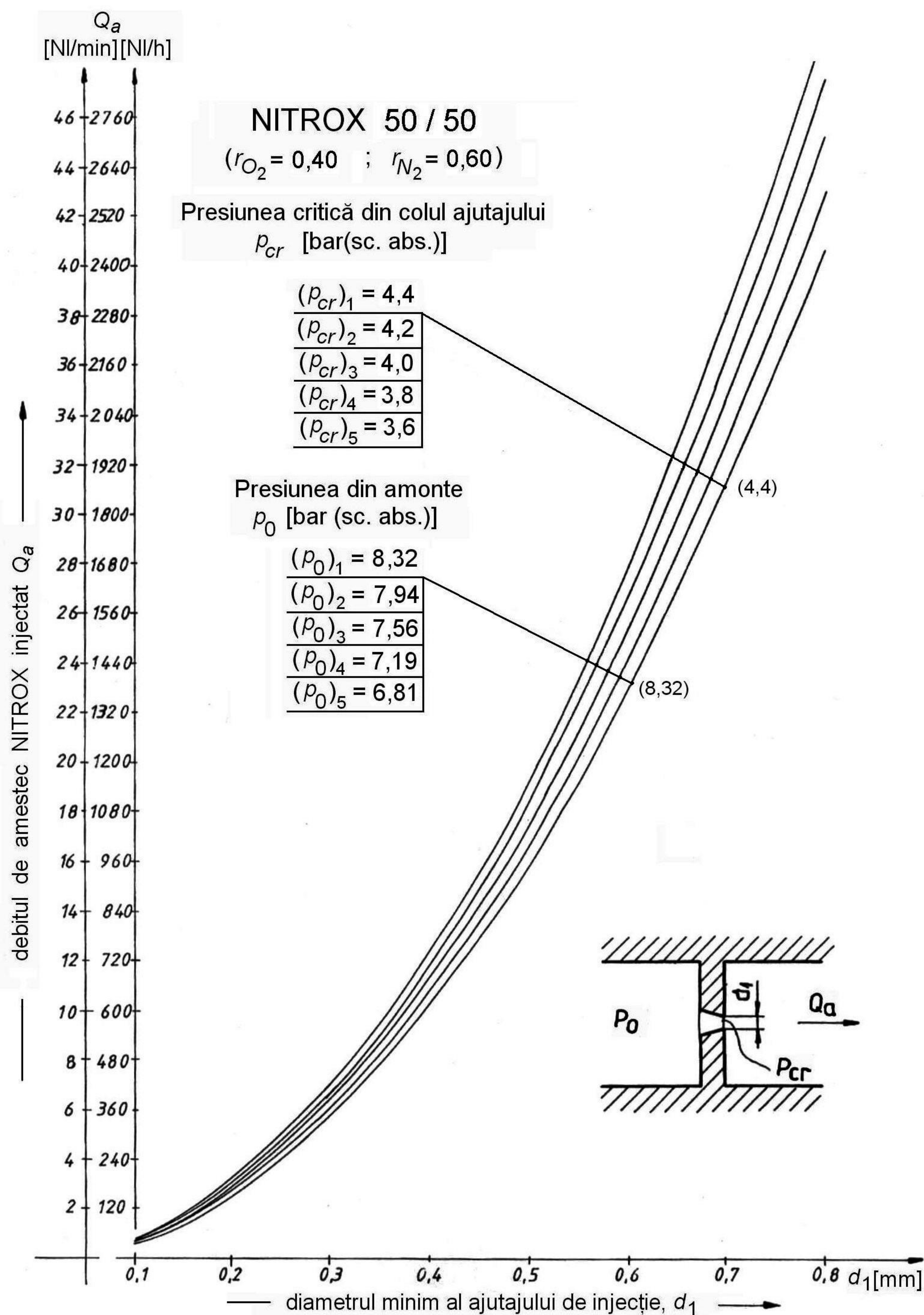


Fig. 5.25. Variaţia debitului Q_a de amestec NITROX 50/50 funcţie de diametrul minim al ajutajului d_1, la diferite presiuni de alimentare p_0.

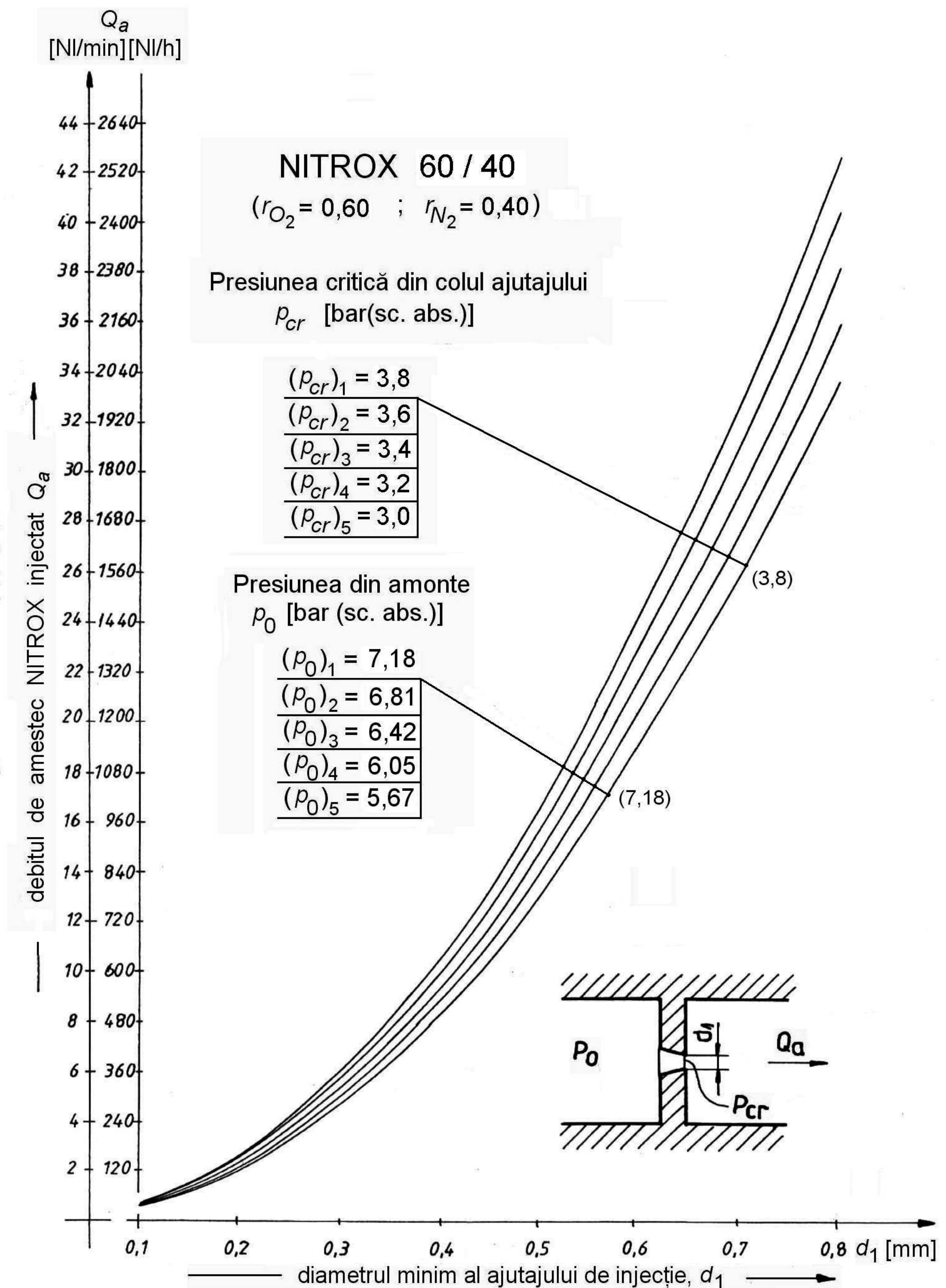


Fig. 5.26. Variaţia debitului Q_a de amestec NITROX 60/40 funcţie de diametrul minim al ajutajului d_1, la diferite presiuni de alimentare p_0.

S-au efectuat experimentări privind caracteristicile gazodinamice ale ajutajelor de injecţie la debit masic constant prin măsurători ale debitelor de amestecuri gazoase

binare pentru diferite ajutaje caracterizate prin diametrele secţiunilor minime d_1, la diferite presiuni de alimentare a ajutajului p_0, cu stabilirea presiunii maxime din aval de ajutaj, $(p_e)_{max} = p_{cr}$, la care se face trecerea de la regim de curgere cu viteza sunetului (curgere în regim critic) la curgerea subsonică în colul ajutajului. De asemenea, s-a măsurat şi diferenţa de presiune pe debitmetru de tip rotametru h_{rot}, pentru efectuarea unor eventuale corecţii de presiune.

Datorită faptului că ieşirea amestecului gazos din rotametru are loc direct în atmosferă, se poate considera, cu foarte bună aproximaţie, că debitul volumic măsurat este determinat totdeauna la condiţii standard normale ($p_{at} = 10^5\ \mathrm{N/m^2}$ (sc.abs.) şi $T = 293{,}16\ \mathrm{K}$) şi, prin urmare, se poate determina cu uşurinţă debitul masic utilizând relaţiile prezentate la începutul acestui capitol. De asemenea, modificările de debit volumic la rotametru sunt proporţionale cu modificările debitului masic. Astfel, atunci când debitul volumic indicat la rotametru rămâne constant ca valoare, rezultă că şi debitul masic rămâne de asemenea constant.

Amestecurile gazoase binare utilizate pentru efectuarea experimentărilor sunt amestecuri binare NITROX cu două concentraţii de oxigen:

– amestec NITROX 21/79 (aer) cu 21% oxigen ($r_{O_2} = 0,21$ şi $r_{N_2} = 0,79$);

– amestec NITROX 40/60 cu 40% oxigen ($r_{O_2} = 0,40$ şi $r_{N_2} = 0,60$).

Presiunea de alimentare a ajutajului p_0, a fost citită la manometrul montat în amonte de ajutaj, această presiune fiind menţinută constantă de reductorul treapta întâi pe întreaga perioadă a măsurării debitelor la presiunea respectivă. Modificarea presiunii p_0 s-a realizat prin reglarea corespunzătoare a reductorului de presiune treapta întâi şi prin manevrarea robinetului de reglaj situat în amonte de ajutajul de injecţie masică.

Presiunea de după ajutaj p_e, a fost citită la manometrul montat în aval de ajutaj, această presiune fiind modificată în domeniul $0 ... (p_e)_{max} = p_{cr}$, deci corespunzător rapoartelor $p_e / p_0 < p_{cr} / p_0$ la p_0 constant, cu citirea debitului volumic Q_a, la rotametru. Pentru urmărirea în continuare a fenomenului s-au efectuat măsurători de debite la $p_0 = \mathrm{constant}$ şi pentru presiuni de ieşire (aval de ajutaj) $p_e > (p_e)_{max} = p_{cr}$, deci pentru rapoarte $p_e / p_0 > p_{cr} / p_0$. Reglarea presiunii p_e la valoarea dorită se realizează prin manevrarea corespunzătoare a robinetelor de reglaj de după ajutaj: pentru robinete complet închise $p_e = p_0 \left(p_e / p_0 = 1 \right)$, iar pentru robinete complet deschise $p_e = 0 \left(p_e / p_0 = 0 \right)$.

Căderea de presiune la rotametru a fost determinată experimental, utilizând un manometru, tub "U" cu apă, valoarea măsurată corespunzând cu valoarea presiunii în amonte de rotametru.

O determinare experimentală s-a realizat prin fixarea unei presiuni de alimentare a ajutajului p_0, prin manevrarea regulatorului treapta întâi şi a robinetului amonte (spre exemplu, în cazul utilizării aerului, până când presiunea citită la manometrul din

amonte devine $p_0 = 85$ m col. apă de mare). Se poate considera, cu o foarte bună aproximaţie, că 10 m col. apă de mare = 1 at = 1 bar. Reglarea presiunii p_0 se realizează cu unul din cele două robinete aval deschis complet (celălalt robinet poate rămâne închis deoarece un singur robinet deschis asigură capacitatea necesară de trecere). Se citeşte valoarea debitului la rotametru pentru robinetul aval deschis complet, presiunea critică la manometru aval fiind $p_e = 0$. Debitul măsurat, corespunzător lui $p_0 = 85$ m col. apă de mare = 9,5 bar (sc. abs.), a fost de 220 N1/h (la condiţii normale). S-au continuat citirile de debite la rotametru pentru presiuni aval p_e din ce în ce mai mari, debitele citite la rotametru rămânând la valoarea iniţială de 220 N1/h. Continuând creşterea presiunii aval, peste o anumită valoare a acesteia $\left(p_e > p_{cr}\right)$ debitul începe să scadă sub 220 N1/h. În acest fel, se determină şi valoarea experimentală a presiunii critice (spre exemplu $p_{cr} = 45$ m col. apă de mare = 5,5 bar (sc. abs.)) până la care debitul injectat prin ajutajul cu diametrul caracteristic $d_1 = 0,205$ mm rămâne blocat la valoarea de 220 N1/h. În continuare, se poate determina raportul critic pe bază de măsurători.

Rezultatele determinărilor experimentale sunt prezentate sintetic în tabelele 5.8 şi 5.9. Astfel, în tabelul 5.8 sunt cuprinse valorile experimentale aferente amestecului NITROX 21/79 cu 21% oxigen (aer), pentru trei tipuri de ajutaje de injecţie masică, caracterizate de următoarele diametre minime: $d_1 = 0,205$ mm, $d_1 = 0,228$ mm şi $d_1 = 0,300$ mm.

În tabelul 5.9 sunt cuprinse valorile experimentale aferente amestecului NITROX 40/60 cu 40% oxigen, pentru aceleaşi ajutaje.

Pentru compararea rezultatelor obţinute prin metoda experimentală cu rezultatele teoretice, în tabelele 5.8 şi 5.9 au fost trecute şi valorile obţinute prin calculul teoretic (valorile presiunii critice p_{cr}, raportul critic p_{cr} / p_0 şi debitul în regim de blocaj Q_a, corespunzătoare diferitelor presiuni de alimentare a ajutajului p_0). Valorile teoretice au fost reprezentate grafic în figura 5.24 alături de cele experimentale ţinând cont şi de faptul, pus în evidenţă experimental, că pentru aceleaşi condiţii, debitele sunt aproximativ aceleaşi, indiferent de tipul amestecului NITROX. Aceasta se întâmplă deoarece atât densităţile diferitelor amestecuri NITROX studiate, cât şi vâscozităţile acestora sunt foarte apropiate ca valoare. Faptul că densităţile şi vâscozităţile amestecurilor NITROX sunt foarte apropiate ca valoare, conduce, şi în cazul măsurătorilor de debite la rotametru, la valori practic egale ale debitelor de diferite amestecuri NITROX pentru aceleaşi condiţii geometrice, de presiune şi temperatură.

Prin urmare, citirea debitelor de amestecuri NITROX la rotametrul etalonat pentru aer la condiţii normale, s-a făcut cu o eroare practic neglijabilă (eroarea fiind cu mult sub eroarea de măsură, relativ scăzută, a rotametrului utilizat).

Tabelul 5.8

Comparaţie între parametrii obţinuţi experimental şi teoretic la diferite ajutaje de injecţie pentru amestec NITROX 21/79 cu 21% oxigen (aer)

Diametrul minim al ajutajului [mm]	Valori experimentale				Valori teoretice		
	p_0 [bar (sc.abs.)]	p_{cr} [bar (sc.abs.)]	p_{cr} / p_0 [-]	Q_a [N1/h]	p_{cr} [bar (sc.abs.)]	p_{cr} / p_0 [-]	Q_a [N1/h]
0,205	9,5	5,5	0,578	220	5,016	0,528	220
	10,0	5,5	0,550	232	5,280	0,528	233
	10,5	6,0	0,571	245	5,544	0,528	247
	11,0	6,0	0,545	258	5,808	0,528	259
	11,5	6,5	0,565	266	6,072	0,528	267
	12,0	6,5	0,541	277	6,336	0,528	279
	12,5	7,0	0,560	288	6,600	0,528	291
	13,5	8,0	0,592	318	7,128	0,528	320
	14,0	8,0	0,571	330	7,392	0,528	330
	14,5	8,5	0,586	345	7,656	0,528	345
	15,0	8,5	0,566	355	7,920	0,528	355
	15,5	9,0	0,560	368	8,184	0,528	368
	16,0	9,0	0,562	379	8,448	0,528	380
	16,5	9,5	0,575	390	8,712	0,528	391
0,228	13,5	8,0	0,592	392	7,128	0,528	395
	14,0	8,0	0,571	408	7,392	0,528	408
	14,5	8,5	0,586	425	7,656	0,528	422
	15,0	8,5	0,566	440	7,920	0,528	440
	15,5	9,0	0,580	455	8,184	0,528	453
	16,0	9,0	0,562	470	8,448	0,528	468
0,300	13,5	8,0	0,592	682	7,128	0,528	682
	14,0	8,0	0,571	708	7,392	0,528	708
	14,5	8,5	0,586	730	7,556	0,528	732
	15,0	8,5	0,586	756	7,920	0,528	759

Din analiza rezultatelor experimentale şi din compararea acestora cu rezultatele teoretice (tab. 5.8, 5.9 şi fig. 5.27) se desprind următoarele elemente:

– valorile debitelor de amestecuri gazoase binare în regim blocat Q_a, determinate experimental sunt foarte apropiate de cele calculate teoretic, diferenţele fiind sub 2%; deci aceste diferenţe foarte mici pot fi puse şi pe seama clasei de precizie a aparatului. Prin urmare, se poate considera că debitele determinate experimental coincid practic cu debitele stabilite teoretic;

– valorile presiunilor critice p_{cr}, determinate experimental sunt mai mari decât cele calculate teoretic, pentru toate măsurătorile efectuate, diferenţa ajungând până la 0,9 bar. Acest lucru se datorează faptului că, prin creşterea presiunii din aval de ajutaj p_e, peste valoarea presiunii critice p_{cr}, se ajunge la o scădere relativ lentă a debitului de amestec, sub valoarea din cazul regimului blocat, o dată cu creşterea presiunii p_e, în special pe prima porţiune de după presiunea critică.

Astfel, s-au determinat experimental chiar variaţii de numai 2 l/h la o creştere a presiunii p_e peste valoarea critică cu 10 m col. apă de mare. Scăderea foarte lentă a debitului pe prima porţiune din afara zonei de blocaj conduce la imposibilitatea de a stabili cu precizie foarte mare valoare experimentală a presiunii critice (în general, valorile măsurate sunt mai mari decât cele calculate);

– rapoartele critice dintre presiunile aval şi amonte de ajutaj p_{cr} / p_0, determinate experimental sunt, de asemenea, mai mari decât cele calculate teoretic, deoarece valorile experimentale ale lui p_{cr} sunt mai mari decât cele teoretice, explicaţia fiind prezentată mai sus;

– valorile debitelor în regim de blocaj Q_a, pentru cele două tipuri de amestecuri NITROX utilizate la experimentări în aceleaşi condiţii de presiune şi pentru aceleaşi ajutaje, sunt practic egale, ceea ce confirmă rezultatele teoretice.

Tabelul 5.9

Comparaţie între parametrii obţinuţi experimental şi teoretic la diferite ajutaje de injecţie pentru amestec NITROX 40/60 cu 40% oxigen

Diametrul minim al ajutajului [mm]	Valori experimentale				Valori teoretice		
	p_0 [bar (sc.abs.)]	p_{cr} [bar (sc.abs.)]	p_{cr} / p_0 [-]	Q_a [N1/h]	p_{cr} [bar (sc.abs.)]	p_{cr} / p_0 [-]	Q_a [N1/h]
	9,5	5,5	0,578	220	5,016	0,528	220
	10,0	5,5	0,550	232	5,280	0,528	233
	10,5	6,0	0,571	245	5,544	0,528	246
	11,0	6,0	0,545	258	5,808	0,528	256
	11,5	6,5	0,565	266	6,702	0,528	266
	12,0	6,5	0,541	280	6,336	0,528	279
0,205	12,5	7,0	0,560	290	6,600	0,528	290
	14,0	8,0	0,571	325	7,392	0,528	330
	9,5	5,5	0,578	271	5,016	0,528	270
	10,0	5,5	0,550	286	5,280	0,528	286
	10,5	6,0	0,571	302	5,544	0,528	302
	11,0	6,0	0,545	318	5,808	0,528	318
0,228	11,5	6,5	0,565	332	6,702	0,528	333
	12,0	6,5	0,541	348	6,336	0,528	348
	12,5	7,0	0,560	362	6,600	0,528	361
	14,0	8,0	0,571	408	7,392	0,528	408
	9,5	5,5	0,578	470	5,016	0,528	471
0,300	10,0	5,5	0,550	500	5,280	0,528	498
	10,5	6,0	0,571	523	5,544	0,528	523
	11,0	6,0	0,545	555	5,808	0,528	552
	11,5	6,5	0,565	579	6,702	0,528	575
	12,0	6,5	0,541	606	6,336	0,528	599
	12,5	7,0	0,560	630	6,600	0,528	620
	14,0	8,0	0,571	705	7,392	0,528	710

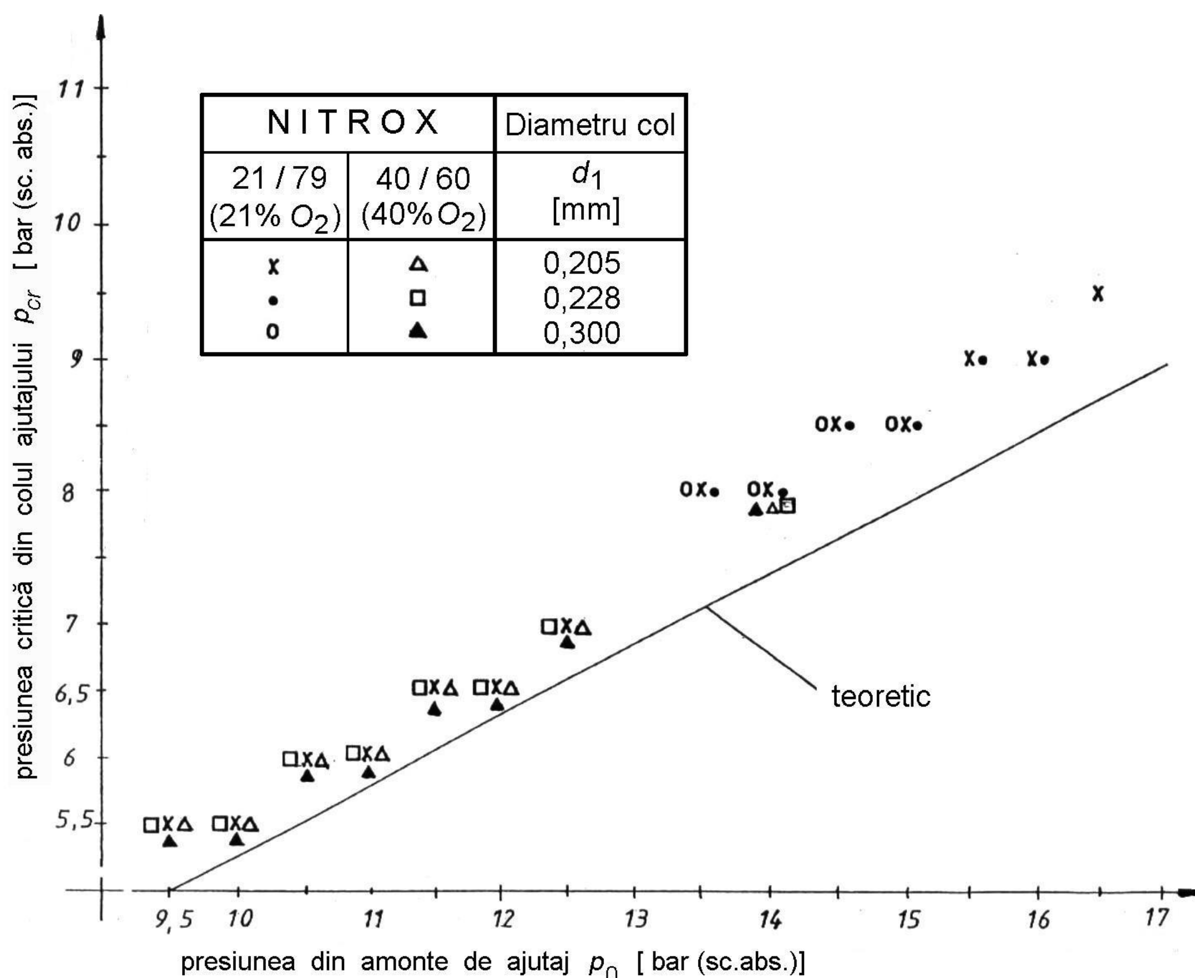


Fig. 5.27. Variaţia presiunii critice p_{cr} funcţie de presiunea de alimentare a ajutajului p_0, valori teoretice şi experimentale, pentru amestecuri NITROX 21/79 şi NITROX 40/60 şi pentru ajutaje de injecţie caracterizate de diametrul minim d_1 de 0,205; 0,228 şi 0,300 mm.

Trebuie, totodată, menţionat faptul că măsurătorile de presiuni în amonte de rotametru au condus la valori foarte mici, cuprinse între 62 mmH_2O şi 82 mmH_2O. Cunoscut fiind faptul că amestecul gazos este evacuat prin rotametru direct în atmosferă şi ţinând cont de valorile foarte mici ale presiunii în amonte de rotametru, se poate admite, cu foarte bună precizie, că debitul indicat la aparat este măsurat la presiunea atmosferică, aşa cum este etalonat acest tip de debitmetru (pentru aer la 20 °C şi 760 torr).

În ceea ce priveşte forma ajutajelor, experimentările au fost efectuate pe ajutaje convergente (ajutajele cu $d_1 = 0,205$ mm şi $d_1 = 0,300$ mm) şi pe ajutaje cilindrice (ajutajul cu $d_1 = 0,228$ mm). Concluzia desprinsă a fost aceea că forma ajutajului nu a influenţat cu nimic valorile experimentale, determinant fiind doar diametrul caracteristic d_1 (diametrul minim corespunzător colului ajutajului). Evident, forma ajutajului şi unghiurile de convergenţă au importanţă în ceea ce priveşte disiparea de energie a amestecului gazos injectat. Pentru echipamentul de scufundare în circuit

semiînchis studiat, mărimea disipării de energie în ajutaj nu este foarte importantă deoarece, la intrarea în sacul respirator are loc, oricum, o disipare substanţială a energiei amestecului gazos injectat.

În ceea ce priveşte ajutajul convergent – divergent, acesta nu a fost studiat datorită greutăţilor tehnologice de realizare precum şi datorită importanţei mici pe care o are studierea lui pentru acest tip de aparat.

Studiile teoretice şi determinările experimentale privind gazodinamica ajutajelor aparţinând blocului de injecţie masică aferent aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis studiat, au pus în evidenţă următoarele concluzii:

– s-au efectuat studii teoretice şi experimentale pentru ajutaje convergente şi cilindrice, lucrând în regim critic, cu atingerea vitezei sunetului şi deci a regimului critic în colul ajutajului şi cu stabilirea unui debit masic injectat în regim blocat;

– studiile teoretice au fost realizate pentru amestecuri binare NITROX cu concentraţii ale oxigenului de 21; 32,5; 40; 50 şi 60%, amestecuri standardizate în scufundări autonome cu destinaţie specială;

– calculele teoretice pentru dimensionarea ajutajelor s-au efectuat corespunzător domeniilor de regim blocat al debitelor masice necesare a fi injectate în sistem. Corespunzător debitelor masice de amestecuri binare NITROX impuse de diferite activităţi ale scafandrilor şi corespunzător adâncimilor maxime de intervenţie, au rezultat diametre caracteristice d_1 cuprinse între 0,1 mm şi 0,6 mm;

– calculele teoretice pentru determinarea debitelor masice în regim de blocaj Q_a, injectate prin ajutaje, s-au efectuat la diferite presiuni de alimentare p_0, pentru diferite amestecuri binare NITROX şi pentru diferite diametre caracteristice d_1. Calculele au pus în evidenţă faptul că debitele masice blocate pentru acelaşi diametru d_1 şi aceleaşi condiţii de presiune p_0, sunt practic egale pentru toate amestecurile NITROX;

– presiunile critice p_{cr}, teoretice, sunt determinate de adâncime maximă de imersie, dictată la rândul ei de tipul amestecului, astfel încât să se evite depăşirea limitei maxime a presiunii parţiale a oxigenului [$p_{O_2} < 1,6...2,0$ bar (sc. abs.)];

– debitele de amestecuri NITROX în regim de blocaj, determinate experimental, sunt foarte apropiate ca valoare de cele stabilite teoretic, abaterea maximă nedepăşind 2%, procentaj care reprezintă eroarea de măsură specifică rotametrului. Deci, se poate afirma că, pentru un anumit ajutaj şi pentru aceleaşi condiţii de presiune şi temperatură, debitele determinate experimental coincid practic cu debitele determinate teoretic;

– presiunile critice p_{cr}, determinate experimental sunt mai mari decât cele stabilite teoretic, diferenţa de până la 0,9 bar fiind datorată variaţiilor foarte mici ale debitului în afara zonei de regim blocat, insesizabile la debitmetru. În calculele de proiectare se pot utiliza valorile teoretice ale lui p_{cr};

– în afara domeniului de debit blocat, pe prima porţiune de după presiunea critică, scăderea foarte lentă a debitului (chiar cu 1% la o creştere a presiunii cu 1 bar) creează un important avantaj prin aceea că, pentru o eventuală depăşire cu câţiva metri a adâncimii limită, teoretice, de scufundare, debitul de amestec gazos injectat rămâne practic acelaşi, fără să fie afectată buna funcţionare a aparatului;

– experimentele au pus în evidenţă faptul că forma ajutajului (convergent sau cilindric) nu influenţează valorile debitelor injectate, determinant fiind diametrul caracteristic d_1.

Studiul teoretic şi experimental al ajutajelor aparţinând blocului de injecţie masică a pus în evidenţă faptul că rezultatele experimentale confirmă rezultatele teoretice.

Blocul de injecţie masică echipat cu ajutaje de injecţie de tipul celor studiate va putea asigura o livrare în regim permanent a unui debit masic blocat de amestec gazos către sacul respirator al aparatului de respirat sub apă cu mare autonomie, cu circuit semiînchis, utilizând amestecuri binare supraoxigenate.

a) *Calculul parametrilor amestecului gazos din sacul respirator*

Calculul parametrilor amestecului gazos din sacul respirator se efectuează plecând de la bilanţul debitelor volumice de gaze în cazul funcţionării în diferite regimuri date de consumul de oxigen al utilizatorului pentru diferite activităţi subacvatice. Bilanţul debitelor este prezentat grafic în schema de calcul a sacului respirator din figura 5.6, paragraful 5.2.1.

Pentru calcule s-au folosit următoarele relaţii:

– pentru calculul participaţiei volumice a oxigenului în amestecul gazos din sacul respirator (relaţia 5-40):

$$r_{O_2,s} = \frac{Q_{O_2,i} - Q_{O_2,c}}{Q_{a,i} - Q_{O_2,c}}, \tag{5-75}$$

– pentru calculul participaţiei volumice a azotului din amestecul gazos al sacului respirator:

$$r_{N_2,s} = 1 - r_{O_2,s}, \tag{5-76}$$

unde: $Q_{O_2,i}$ este debitul volumic de oxigen din amestecul respirator injectat în sac; $Q_{O_2,i} = r_{O_2,i}\, Q_{a,i}$, $Q_{O_2,c}$ debitul volumic de oxigen consumat de scafandru, $Q_{a\,i}$ debitul volumic gazos injectat în sacul respirator, iar $r_{O_2,i}$ participaţia volumică de oxigen din amestecul gazos injectat în sacul respirator.

Calculele au fost efectuate pentru amestecuri NITROX cu concentraţia oxigenului de 32,5; 40; 50 şi 60% injectate în sacul respirator şi pentru consumuri de oxigen ale scafandrului cuprinse între 0,5 şi 2 Nl/min cu pasul de 0,5 N1/min. Rezultatele calculelor sunt prezentate grafic în figura 5.28 pentru amestec NITROX 32,5/67,5 (32,5% N_2 şi 67,5% N_2), în figura 5.29 pentru amestec NITROX 40/60, în figura 5.30 pentru amestec NITROX 50/50 şi în figura 5.31 pentru amestec NITROX 60/40.

Experimentările au fost efectuate cu 37 de subiecţi diferiţi, dintre care o parte au fost folosiţi la toate scufundările, iar o parte, de cel mult de două ori la aceiaşi scufundare. Lotul de subiecţi pentru experimentări a fost un lot eterogen, ales în mod aleatoriu dintre scafandri profesionişti, amatori şi începători (cursanţi). Vârstele subiecţilor au fost cuprinse între 19 şi 47 ani.

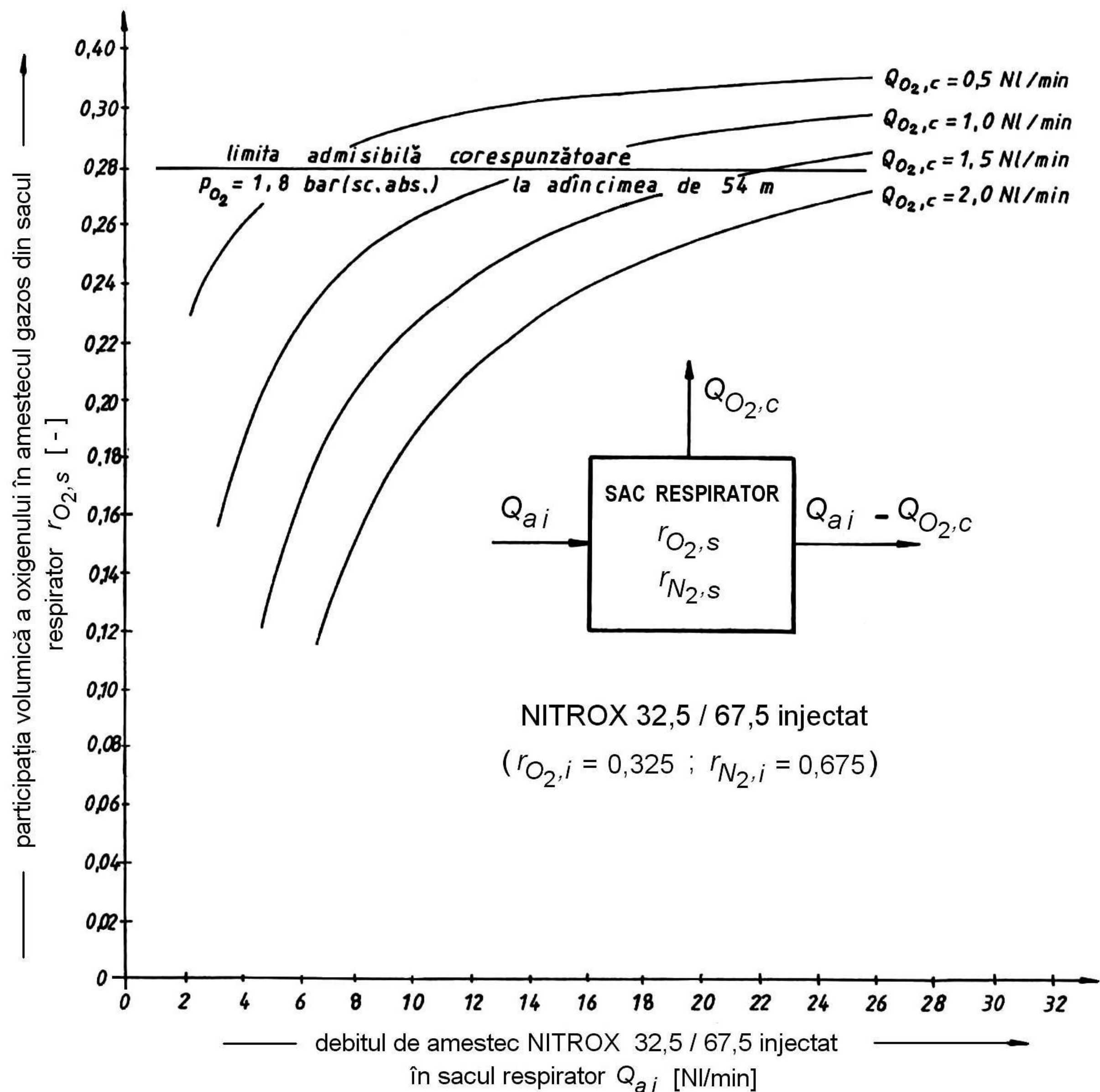


Fig. 5.28. Variaţiile participaţiilor volumice ale oxigenului din amestecul gazos din sacul respirator $r_{O_2,s}$, la diferite consumuri de oxigen $Q_{O_2,c}$, funcţie de debitul de amestec NITROX 32,5/67,5 injectat în sacul respirator Q_{ai}.

O primă serie de încercări a fost efectuată cu aparatul de respirat cu circuit semiînchis reglat pentru un debit continuu de amestec NITROX 40/60 (40% oxigen) de 1,8 Nl/min (106 N1/h) în condiţii hiperbarice uscate (în barocamere) şi la presiunea atmosferică, subiecţii aflaţi în repaus, poziţia aşezat, precum şi în condiţii reale, imersaţi în apă. S-a pornit cu acest debit redus, gândindu-se la o autonomie cât mai mare, dar acest lucru s-a dovedit a nu fi de importanţă absolută. Pe timpul experimentărilor s-a respirat timp de 30 minute, în condiţii de presiune şi temperatură constantă, efectuându-se măsurători ale concentraţiei de oxigen din sacul respirator din 5 în 5 minute începând cu minutul 10.

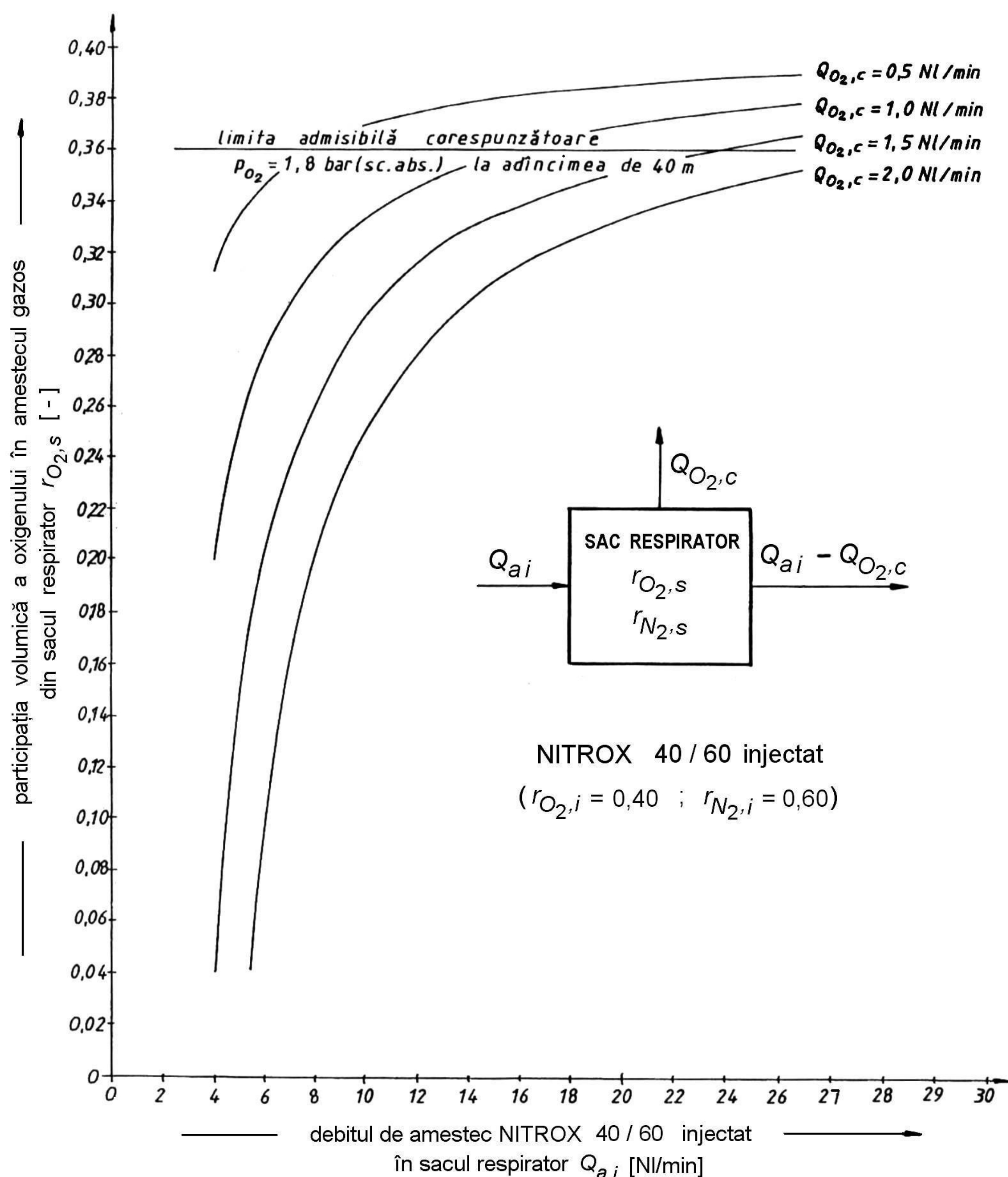


Fig. 5.29. Variaţiile participaţiilor volumice ale oxigenului din amestecul gazos din sacul respirator $r_{O_2,s}$, la diferite consumuri de oxigen $Q_{O_2,c}$, funcţie de debitul de amestec NITROX 40/60 injectat în sacul respirator Q_{ai}.

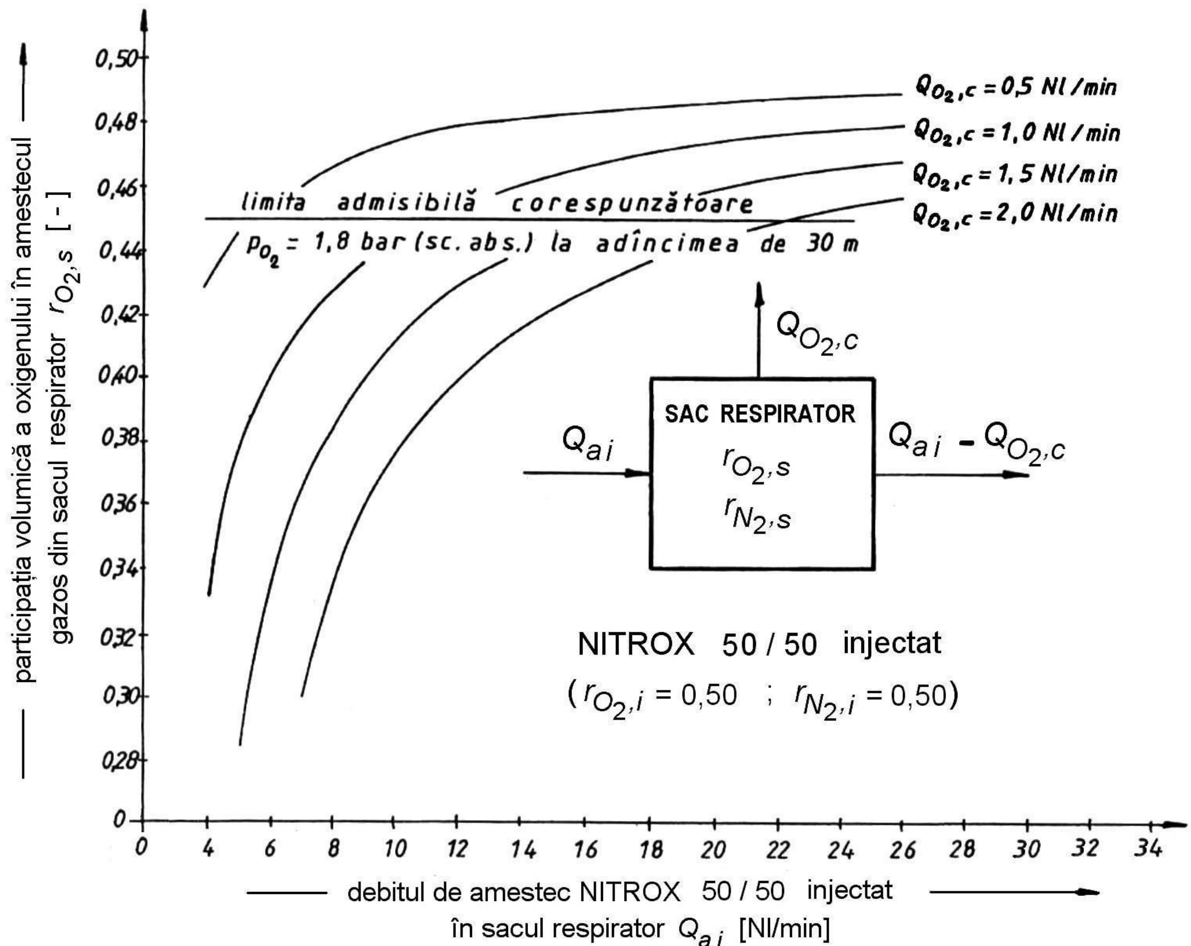


Fig. 5.30. Variaţiile participaţiilor volumice ale oxigenului din amestecul gazos din sacul respirator $r_{O_2,s}$, la diferite consumuri de oxigen $Q_{O_2,c}$, funcţie de debitul de amestec NITROX 50/50 injectat în sacul respirator Q_{ai}.

Măsurătorile au fost efectuate cu ajutorul unui analizor de oxigen tip Taylor-Servomex a cărui clasă de precizie este de 0,1. S-au efectuat măsurători la 87 de subiecţi. Rezultatele măsurătorilor sunt prezentate în tabelele 5.10 şi 5.11, iar în figura 5.32 sunt reprezentate grafic variaţiile participaţiilor volumice din amestecul gazos al sacului respirator, pentru diferite situaţii în care au fost executate măsurătorile.

Din analiza datelor prezentate în tabelele 5.10 şi 5.11 şi din figura 5.32 se pot trage următoarele concluzii:

– debitul de amestec NITROX 40/60 (40% oxigen) ales, de 1,8 N1/min, satisface nevoile de consum ale scafandrilor pentru condiţii de repaus în mediul hiperbaric uscat sau în imersie;

– abaterea medie pătratică a participaţiilor volumice ale oxigenului din amestecul gazos din sacul respirator, ca urmare a consumului scafandrilor, este mare. Cea mai mare abatere este remarcată în experimentul efectuat la presiunea atmosferică (între 19,9% şi 32% oxigen), deci o plajă de variaţie a concentraţiei de oxigen de 12,1%, care nu poate fi acceptată pentru condiţii reale. Cea mai mică variaţie a fost de 4,2%,

la experimentul în condiţii hiperbare uscate (barocameră) la 3,1 bar (sc. abs.), dar şi aceasta este destul de mare;

– concentraţia minimă a oxigenului din sacul respirator, după consumul scafandrilor, atinge valoarea celei din aerul atmosferic, ceea ce nu conferă utilizării acestui debit de amestec NITROX supraoxigenat alt avantaj decât cel legat de autonomie, nu şi un randament al scufundării sporit;

– datele experimentale sunt pentru scafandrii în stare de repaus, în următoarele condiţii:

1. La presiunea atmosferică, 1 bar (sc. abs.), (15 subiecţi); consum mediu de oxigen: $Q_{O_2,c} = 0,33 \pm 0,06$ Nl/min;
2. La presiunea de 3,1 bar (sc. abs.), în mediu hiperbaric uscat (barocameră) (15 subiecţi); consum mediu de oxigen: $Q_{O_2,c} = 0,29 \pm 0,03$ Nl/min;

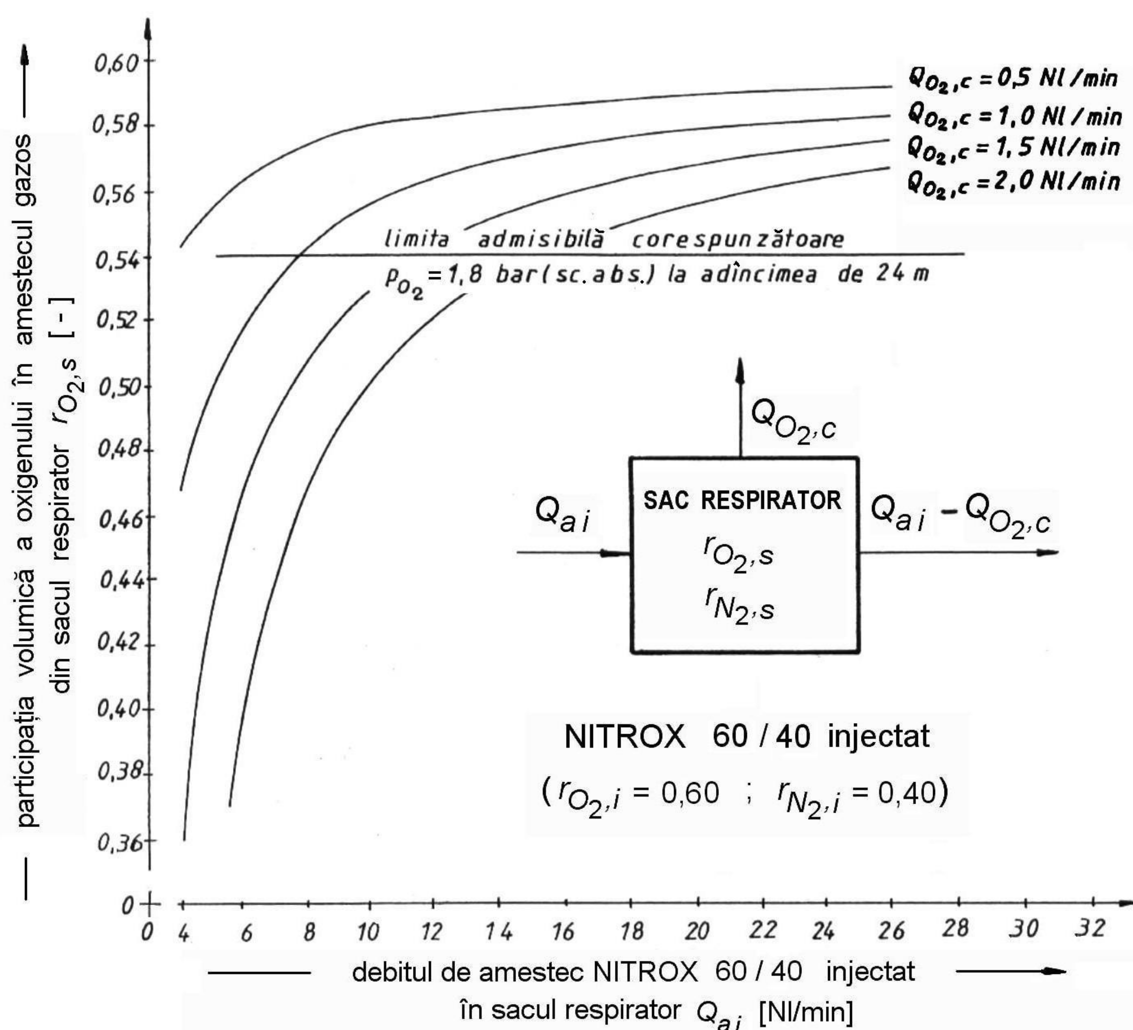


Fig. 5.31. Variaţiile participaţiilor volumice ale oxigenului din amestecul gazos din sacul respirator $r_{O_2,s}$, la diferite consumuri de oxigen $Q_{O_2,c}$, funcţie de debitul de amestec NITROX 60/40 injectat în sacul respirator Q_{ai}.

3. La presiunea de 5,2 bar (sc. abs.), în mediu hiperbaric (barocameră) (14 subiecţi); consum mediu de oxigen: $Q_{O_2,c} = 0,28 \pm 0,04$ N1/min;
4. La presiunea de 1,1 bar (sc. abs.), în imersie (15 subiecţi); consum mediu de oxigen: $Q_{O_2,c} = 0,35 \pm 0,05$ N1/min;
5. La presiunea de 3,1 bar (sc. abs.), în imersie (13 subiecţi); consum mediu de oxigen: $Q_{O_2,c} = 0,32 \pm 0,03$ N1/min;
6. La presiunea de 5,2 bar (sc. abs.), în imersie (15 subiecţi); consum mediu de oxigen: $Q_{O_2,c} = 0,28 \pm 0,05$ N1/min;

– datorită utilizării, la măsurători, a unui analizor de oxigen cu clasa de precizie foarte bună (0,1), rezultatele experimentale privind variaţia participaţiei volumice de oxigen din sacul respirator se suprapun cu cele rezultate din calcul.

Tabelul 5.10

Datele experimentale obţinute la utilizarea aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis de mare autonomie, în mediu hiperbaric uscat (barocameră) cu debit de amestec NITROX 40/60 (40% oxigen) injectat $Q_{ai} = 1,8$ N1/min

Subiect	Vârsta [ani]	Presiunea atmosferică $Q_{O_2,c}$ [N1/min]	Presiunea atmosferică $\%O_{2,s}$	3,1 bar (sc. abs.) $Q_{O_2,c}$ [N1/min]	3,1 bar (sc. abs.) $\%O_{2,s}$	5,2 bar (sc. abs.) $Q_{O_2,c}$ [N1/min]	5,2 bar (sc. abs.) $\%O_{2,s}$
SL	31	0,34	25,6±0,62	0,23	31,0±0,35	0,21	31,7±0,26
GM	38	0,45	19,9±0,82	0,32	27,0±0,50	0,34	25,4±0,34
BV	36	0,36	24,1±0,97	0,30	27,8±0,69	0,29	28,4±0,69
SA	29	0,22	31,5±0,84	0,23	31,7±1,02		
GM	38	0,37	24,1±0,55	0,31	27,1±0,50		
SL	31	0,29	28,1±0,52	0,24	30,5±0,38		
NP	20	0,42	21,4±0,74	0,33	26,8±1,82	0,36	24,6±0,49
MI	20	0,34	25,4±0,65	0,31	27,7±1,07	0,30	27,6±0,75
OG	20	0,31	27,0±0,84			0,20	29,7±0,87
EF	20	0,34	25,4±1,24	0,26	29,6±0,41	0,28	28,8±0,64
PD	35	0,23	31,2±1,35	0,26	29,6±0,54	0,25	29,9±0,38
BA	41	0,25	30,3±0,42				
MM	32	0,34	25,8±0,75				
SG	31	0,30	27,5±0,63				
FR	34	0,32	26,8±1,04	0,29	28,4±0,35	0,23	31,0±0,52
BD	31			0,29	26,4±1,30		
PD	25			0,25	30,3±0,80	0,25	29,9±0,43
BV	36			0,26	30,2±0,85		
LV	40			0,29	28,4±0,12	0,35	26,3±1,34
PD	25					0,26	29,8±0,27
TP	34					0,29	28,9±1,24
Media		0,33	26,3±3,30	0,29	28,9±1,52	0,28	28,7±2,06

Tabelul 5.11

Datele experimentale obţinute la utilizarea aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis de mare autonomie, la imersia în apă, în condiţii de repaus, cu debit de amestec NITROX 40/60 (40% oxigen) injectat $Q_{ai} = 1{,}8$ N1/min

Subiect	Vârsta [ani]	Presiunea					
		1,1 bar (sc. abs.)		3,1 bar (sc. abs.)		5,2 bar (sc. abs.)	
		$Q_{O_2,c}$ [N1/min]	$\%O_{2,\text{sac}}$	$Q_{O_2,c}$ [N1/min]	$\%O_{2,\text{sac}}$	$Q_{O_2,c}$ [N1/min]	$\%O_{2,\text{sac}}$
SL	31	0,30	27,7±0,50			0,29	28,3±1,25
BV	36	0,30	27,7±0,43	0,32	26,9±0,85	0,23	31,0±0,00
AM	33	0,33	26,4±0,65			0,36	24,9±1,38
DG	20	0,41	21,9±0,51				
GC	19	0,41	21,9±0,51	0,30	27,5±0,71		
SA	29	0,28	23,7±1,18	0,27	29,4±1,08	0,20	32,5±1,06
CI	20	0,43	20,5±0,39				
PD	35	0,30	27,7±0,48	0,29	28,5±1,11	0,27	28,5±1,22
IM	20	0,36	24,6±0,48				
LV	40	0,40	22,8±1,10	0,37	24,5±1,94	0,36	24,4±2,05
BV	36	0,33	26,2±1,21			0,28	28,5±1,29
SA	29	0,30	28,0±0,79			0,23	31,0±0,50
MM	32	0,36	24,6±0,65	0,29	28,4±0,63	0,24	30,5±0,50
LV	40	0,36	24,9±0,42			0,28	28,5±1,32
BG	20			0,30	28,2±1,80		
IG	20			0,32	26,8±1,15		
PA	41			0,34	25,5±0,82		
PD	35			0,31	27,1±0,30		
MM	32			0,34	25,8±0,59	0,27	29,0±1,32
JC	20			0,37	24,3±1,85	0,29	28,3±1,93
SL	31					0,31	27,1±1,75
MM	32					0,26	29,5±1,29
Media		0,35	24,9±2,40	0,32	26,8±1,60	0,28	28,6±2,18

Ca urmare a concluziilor de mai sus s-a trecut la etapa a doua de experimentări, în care debitul de amestec NITROX a fost mărit la 10,5 N1/min (630 N1/h). Pentru că pe timpul acestor experimentări a fost utilizat un amestec NITROX 38/62 (cu concentraţia oxigenului de 38%), calculele au fost refăcute pentru acest amestec. Experimentările s-au realizat cu un număr de 81 subiecţi care au format un lot eterogen, în condiţii de efort dozat (30 W) în mediu hiperbaric uscat şi în imersie în apă. Efortul a fost realizat prin ridicarea unei greutăţi, cu ajutorul unui picior într-un ritm specific caracteristicilor morfometrice ale subiecţilor. Condiţiile privind efectuarea analizei concentraţiei de oxigen din sacul respirator au fost aceleaşi ca şi la etapa precedentă.

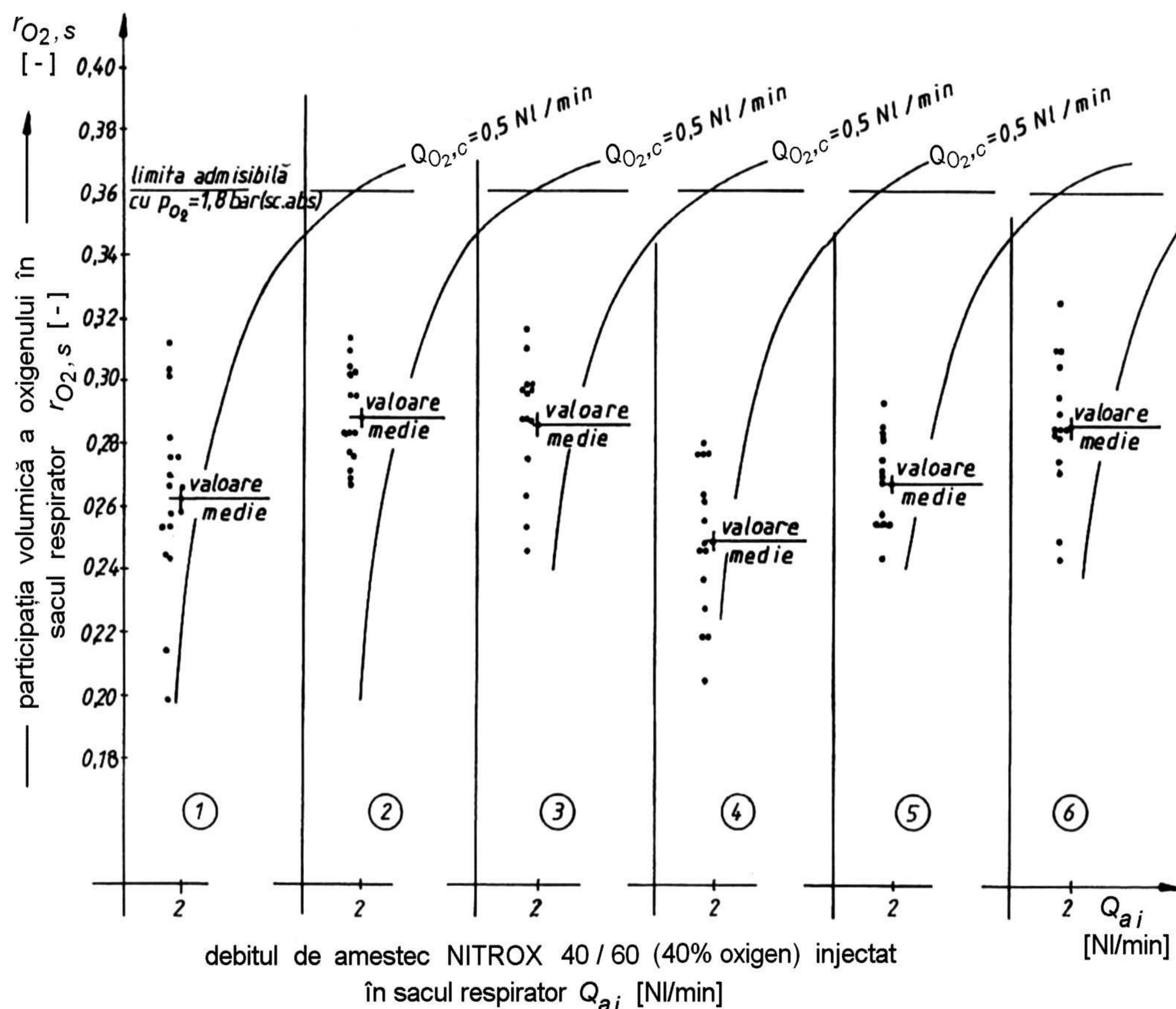


Fig. 5.32. Variaţia participaţiilor volumice de oxigen din sacul respirator $r_{O_2,s}$, funcţie de consumul scafandrului $Q_{O_2,c}$, la un debit de amestec NITROX 40/60 (40% oxigen) injectat $Q_{ai} = 1{,}8$ N1/ min, pentru cele 6 situaţii prezentate în text. Punctele din grafice reprezintă valorile experimentale, iar curbele continue rezultă din calcule teoretice pentru $Q_{O_2,c} = 0{,}5$ N1/ min .

Rezultatele determinărilor exprimentale sunt prezentate în tabelele 5.12 şi 5.13, iar în figura 5.33 sunt reprezentate grafic variaţiile participaţiilor volumice ale oxigenului din amestecul gazos al sacului respirator $r_{O_2,s}$, pentru diferite situaţii în care au fost executate experimentările.

Tabelul 5.12

Datele experimentale obţinute la utilizarea aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis de mare autonomie, în mediu hiperbaric uscat, în condiţii de efort dozat (30 W) cu debit de amestec NITROX 38/62 (38% oxigen) injectat $Q_{ai} = 10,5\ \mathrm{Nl/min}$

Subiect	Vârsta [ani]	P r e s i u n e a					
		1,5 bar (sc. abs.)		3,4 bar (sc. abs.)		5,2 bar (sc. abs.)	
		$Q_{O_2,c}$ [N1/min]	$\%O_2, sac$	$Q_{O_2,c}$ [N1/min]	$\%O_2, sac$	$Q_{O_2,c}$ [N1/min]	$\%O_2, sac$
LV	40	0,98	32,8±0,45			0,77	33,5±0,72
BV	36	0,85	33,7±0,43	0,78	33,9±0,96	0,72	33,0±0,06
PD	35	1,01	32,6±0,95	1,03	32,3±0,41	0,71	33,0±0,00
IR	47	0,76	34,2±1,50	0,76	34,3±1,04		
TP	35	0,72	34,6±0,55				
SL	32	0,78	34,1±0,42	0,63	35,1±0,65		
BV	36	0,85	33,7±0,90	0,90	33,4±0,65	0,83	32,5±0,57
BA	36	0,89	33,1±0,75	0,76	33,9±0,89		
AN	39	0,99	32,7±0,29				
PD	35	0,96	33,0±0,61				
SA	30	0,89	33,3±1,50	0,94	33,1±0,42	1,00	32,4±0,43
NM	41	1,05	32,1±0,65				
SV	36	1,06	32,3±0,50				
MI	32	0,94	32,7±1,15				
PD	35	0,92	33,1±0,42				
PM	36			0,81	33,6±0,96	1,01	31,2±1,50
VB	37			1,05	32,3±0,27	1,06	32,0±0,31
SL	32			1,01	32,4±0,22		
MA	30			0,80	33,0±0,50		
HP	34			0,87	32,2±1,14	0,90	31,6±0,25
FC	36			1,25	31,3±0,35		
SA	30					0,70	33,4±0,43
PM	36					0,83	32,4±0,63
AM	33					0,83	32,3±1,04
CF	31					0,85	32,0±0,00
VS	31					0,97	31,4±0,48
BL	37					0,64	33,5±0,52
AD	32					0,86	32,3±1,04
RM	39					0,77	33,0±0,10
CF	31					0,86	32,4±0,25
BD	33					0,78	32,6±0,25
SA	30					0,97	31,4±0,63
AD	32					1,06	30,4±0,25
PM	36					0,99	30,5±1,08
CF	31					1,11	30,5±0,63
BD	33					1,18	30,3±0,35
ID	33					0,90	32,1±0,25
NV	39					0,88	30,7±0,21
Media		0,91	33,2±0,73	0,90	33,1±1,03	0,89	32,1±0,97

Tabelul 5.13

Datele experimentale obţinute la utilizarea aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis de mare autonomie, în imersie, în condiţii de efort dozat (30 W), cu debit de amestec NITROX 38/62 (38% oxigen) injectat $Q_{ai} = 10,5\ \text{N1/min}$

Subiect	Vârsta [ani]	Presiunea					
		1,5 bar (sc. abs.)		3,4 bar (sc. abs.)		5,2 bar (sc. abs.)	
		$Q_{O_2,c}$ [N1/min]	$\%O_2,sac$	$Q_{O_2,c}$ [N1/min]	$\%O_2,sac$	$Q_{O_2,c}$ [N1/min]	$\%O_2,sac$
LV	41	1,02	30,8±0,29	1,09	31,1±0,55		
PM	36	1,08	30,3±0,27	0,94	31,8±0,24	1,22	29,7±0,36
ID	33	1,17	29,6±0,25				
PM	36	1,01	30,8±0,26	0,76	33,1±0,25	0,77	31,9±0,48
HP	34	1,16	30,0±0,65				
SA	30	0,87	31,4±1,31	1,09	31,3±1,03	0,88	31,7±0,14
DF	25	1,29	29,0±0,60				
CF	31	1,13	30,0±0,00				
LV	41	1,19	30,2±0,47				
SL	32	1,26	29,4±0,75	0,86	32,5±0,00	0,81	32,4±0,31
BV	36	0,97	31,0±0,82	0,90	32,1±0,82	1,20	30,0±0,00
PD	35	1,15	29,9±1,34	0,87	32,6±0,65		
SL	32	1,13	30,4±0,22			1,27	29,4±0,25
SA	30	0,97	31,3±1,32			0,84	31,5±0,00
PA	41			0,98	31,6±0,43		
NV	39			0,96	32,0±0,54	1,41	28,5±0,20
BV	36			1,08	31,3±0,50		
MM	32			1,02	31,1±0,48	0,84	31,4±0,48
BT	20			1,21	30,4±1,12		
DG	20					1,21	29,7±0,47
NV	39					1,03	31,2±0,24
MM	32					0,65	32,5±0,70
Media		1,10	30,3±0,71	0,98	31,7±0,77	1,01	30,8±1,30

Din analiza datelor prezentate în tabelele 5.12 şi 5.13 şi din figura 5.33 se pot trage următoarele concluzii:

– debitul de amestec NITROX ales ($Q_{ai} = 10,5\ \text{N1/min}$) satisface nevoile de consum ale scafandrilor în condiţii de efort, în mediul hiperbaric uscat sau în imersie;

– abaterea medie pătratică a participaţiei volumice a oxigenului din amestecul respirator, ca urmare a consumului scafandrului, se încadrează în limitele ± 1%, cu un maxim de ± 2%, ceea ce permite utilizarea aparatului în condiţii de securitate şi revenirea la presiunea atmosferică după tabelele calculate pentru amestecuri supraoxigenate cu 30% oxigen;

– datorită utilizării unui analizor de oxigen cu clasa de precizie foarte bună (0,1), rezultatele experimentale privind variaţia participaţiei volumice de oxigen din amestecul gazos al sacului respirator, funcţie de consumul scafandrului, se suprapun cu cele rezultate din calcul;

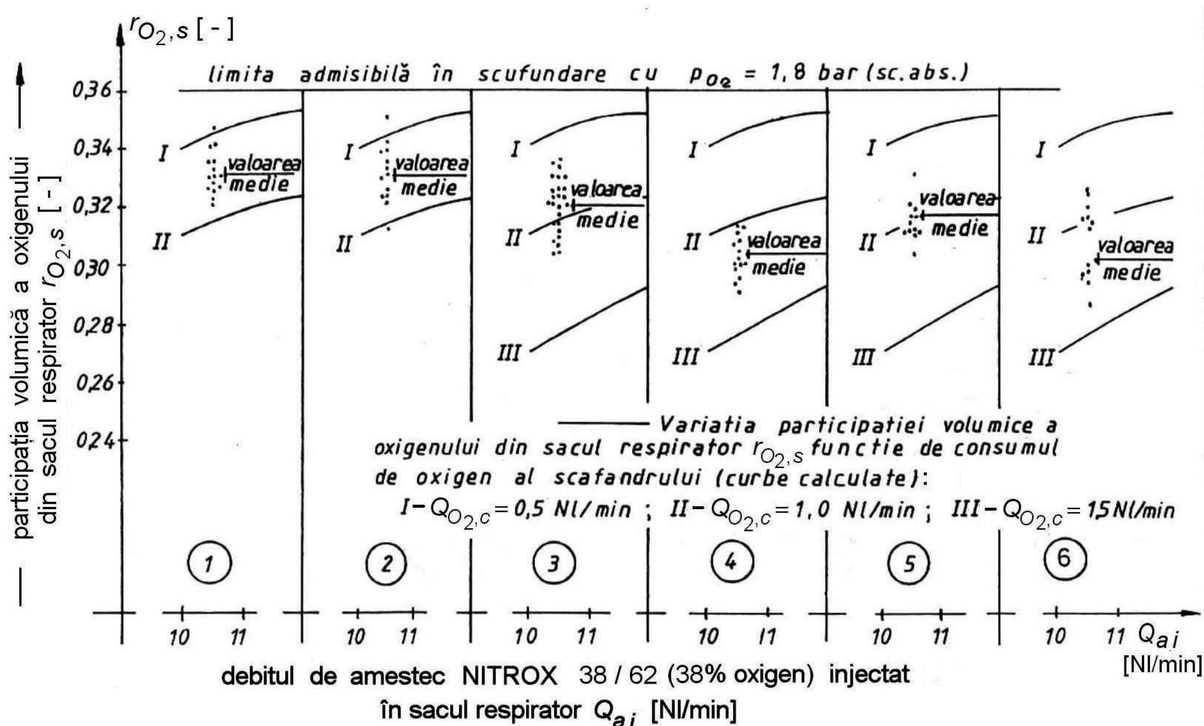


Fig. 5.33. Variaţia participaţiilor volumice de oxigen din amestecul gazos al sacului respirator $r_{O_2,s}$, funcţie de consumul scafandrului $Q_{O_2,c}$, la un debit de amestec NITROX 38/62 (38% oxigen) injectat $Q_{ai} = 10,5$ N1/min, pentru cele 6 situaţii prezentate în text.

– datele experimentale pentru scafandri supuşi unui efort dozat (30 W), au fost obţinute în următoarele condiţii:

1. La presiunea de 1,5 bar (sc. abs.) (15 subiecţi); consum mediu de oxigen: $Q_{O_{2,c}} = 0,91 \pm 0,10$ N1/ min, în mediu hiperbaric uscat (barocameră);
2. La presiunea de 3,4 bar (sc. abs.) (13 subiecţi); consum mediu de oxigen: $Q_{O_2,c} = 0,90 \pm 0,16$ N1/ min, în mediu hiperbaric uscat (barocameră);
3. La presiunea de 5,2 bar (sc. abs.) (25 subiecţi); consum mediu de oxigen: $Q_{O_2,c} = 0,89 \pm 0,14$ N1/ min, în mediu hiperbaric uscat (barocameră);
4. La presiunea de 1,5 bar (sc. abs.) (14 subiecţi); consum mediu de oxigen: $Q_{O_2,c} = 1,10 \pm 0,12$ N1/ min, în imersie;
5. La presiunea de 3,4 bar (sc. abs.) (12 subiecţi); consum mediu de oxigen: $Q_{O_2,c} = 0,98 \pm 0,13$ N1/ min, în imersie;
6. La presiunea de 5,2 bar (sc. abs.) (12 subiecţi); consum mediu de oxigen: $Q_{O_2,c} = 1,01 \pm 0,24$ N1/ min, în imersie.

Experimentările au continuat şi pentru un debit de amestec NITROX injectat, de 12,2 N1/min. În figura 5.34 sunt prezentate pentru comparaţie, rezultatele experimentale privind variaţia participaţiilor volumice ale oxigenului din amestec gazos al sacului respirator, funcţie de consumul scafandrului, în condiţii de scufundare în mediul hiperbaric uscat, la presiunea de 5,2 bar (sc. abs.).

Se remarcă o diferenţă foarte mică între caracteristicile amestecului gazos din sacul respirator pentru debite de 10,5 N1/min şi 12,2 N1/min amestec gazos NITROX supraoxigenat, injectat. În aceste situaţii, unde concentraţia de oxigen nu scade sub 30%, se permite revenirea la presiunea atmosferică conform tabelei de decompresie după scufundări cu amestecuri supraoxigenate cu 30% oxigen. Pentru a ilustra mai exact diferenţele dintre aparatele de respirat sub apă utilizate şi debitul de amestec NITROX injectat în sacul respirator aferent aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis, este prezentată o comparaţie în figura 5.35.

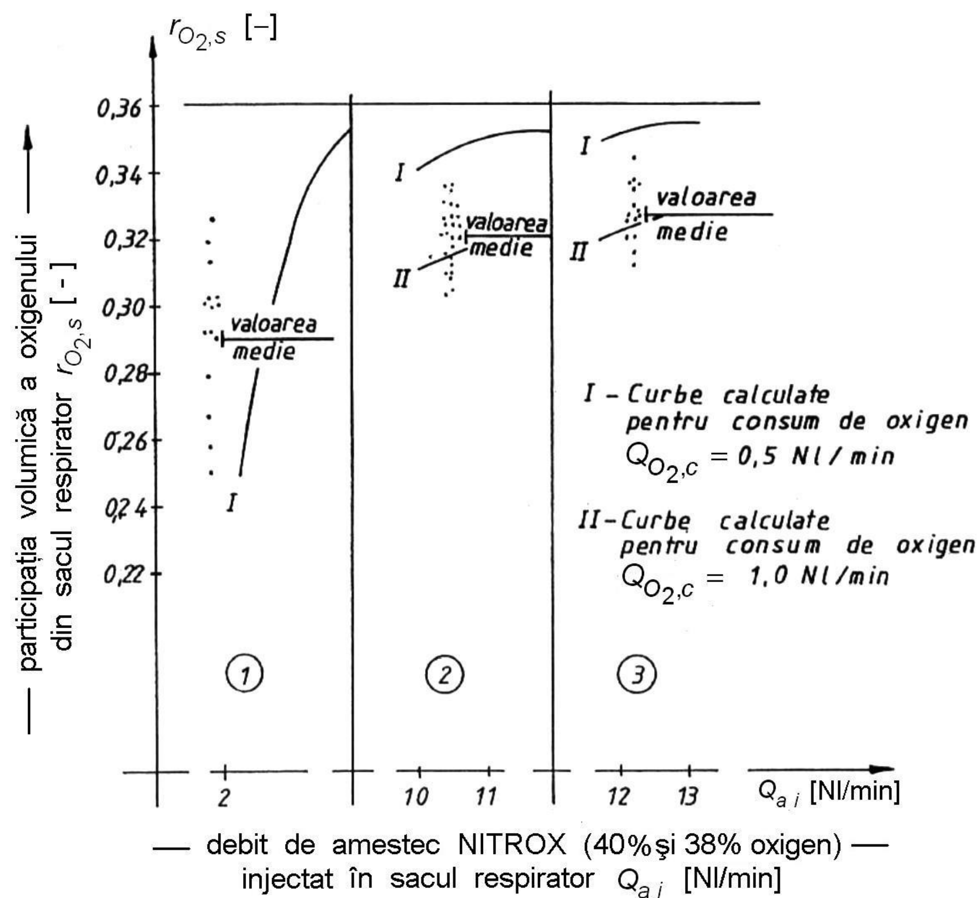


Fig. 5.34. Comparaţie între rezultatele experimentale obţinute pentru participaţiile volumice ale oxigenului din sacul respirator $r_{O_2,s}$, funcţie de consumul scafandrului $Q_{O_2,c}$, în condiţii de scufundare în mediul hiperbaric uscat, la presiunea de 5,2 bar (sc. abs.), pentru cele 3 situaţii prezentate în text.

Ţinând cont de faptul că aparatul de respirat sub apă în circuit semiînchis, cu debit masic constant, este dotat cu o rezervă de amestec gazos NITROX formată din două butelii de 4 l fiecare, presurizate la 200 bar, capacitatea totală fiind de 1600 N1, din care sunt utilizabili 1480 N1, s-au făcut calculele privind autonomia aparatului, funcţie de consumul scafandrilor, pentru patru situaţii:

– aparat de respirat sub apă cu circuit deschis: 26 minute autonomie;

– aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu debit de amestec NITROX injectat de 1,8 N1/min: 822 minute autonomie;

– aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu debit de amestec NITROX injectat de 10,5 N1/min: 140 minute autonomie;
– aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu debit de amestec NITROX injectat de 12,2 N1/min: 121 minute autonomie.

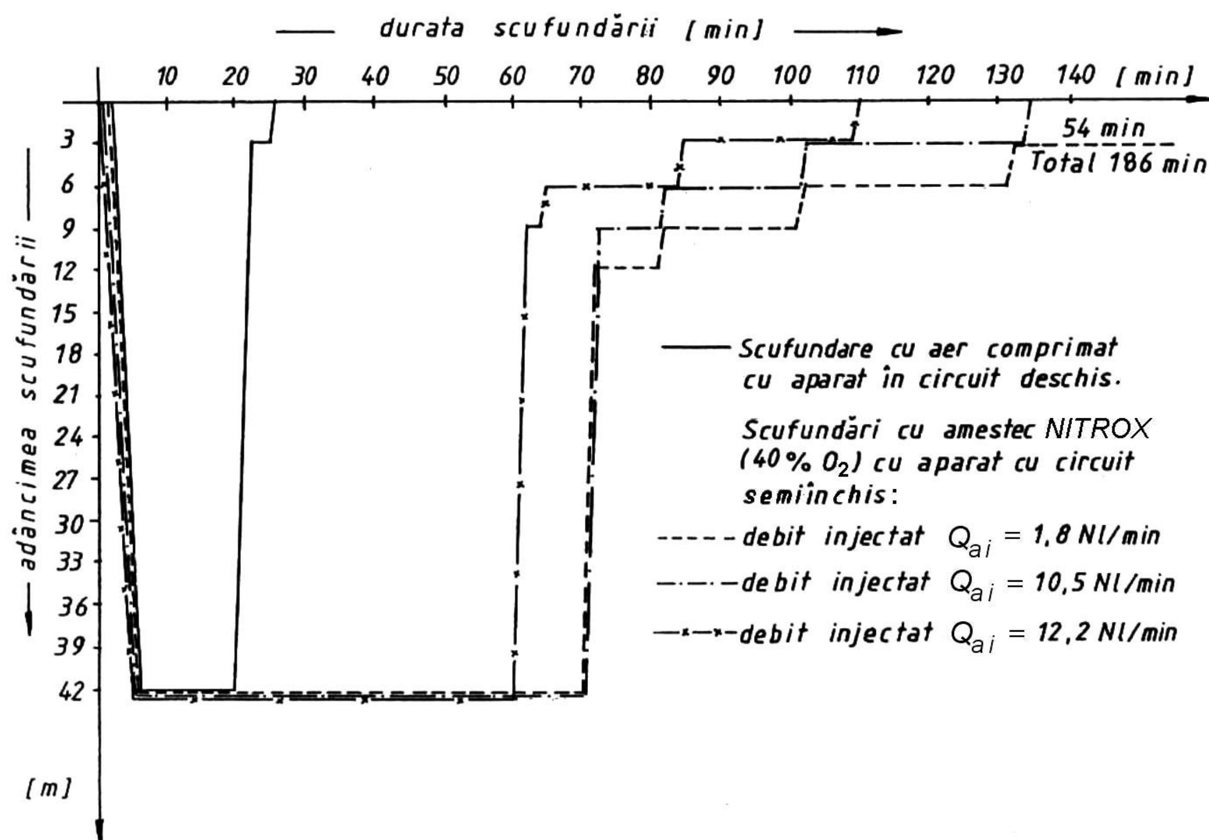


Fig. 5.35. Comparaţie între utilizarea diferitelor aparate de respirat sub apă la diferite debite de injecţie a amestecului NITROX supraoxigenat, la 42 m adâncime. Decompresia este realizată după tabelele LH – 82 şi cu amestecuri supraoxigenate, calculate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanţa.

Din datele prezentate mai sus se remarcă o diferenţă foarte mare între autonomia aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis şi cele cu circuit semiînchis. Diferenţele dintre aceste autonomii sunt mai mult decât semnificative, de 4,6 până la 31,6 ori mai mici, în cazul utilizării aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis. O analiză mai completă este realizată printr-o exemplificare (fig. 5.35), pentru o scufundare la 42 m adâncime, ţinându-se cont de autonomia aparatelor.

Se remarcă, şi în acest exemplu, eficienţa aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu debit masic constant de amestec NITROX injectat.

Datele comparate în figura 5.34 sunt pentru următoarele situaţii:

1. 15 subiecţi în repaus; debit de injecţie $Q_{ai} = 1{,}8$ N1/min;
2. 25 subiecţii la efort dozat (30 W); debit de injecţie $Q_{ai} = 10{,}5$ N1/min;
3. 14 subiecţi la efort dozat (30 W); debit de injecţie $Q_{ai} = 12{,}2$ N1/min.

Din analiza graficului din figura 5.35 se observă că aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu debit constant de amestec NITROX mic ($Q_{ai} = 1{,}8$ N1/min), deşi oferă o autonomie foarte mare, nu permite un timp de lucru efectiv sub apă mai mare decât acelaşi aparat alimentat cu un debit constant $Q_{ai} = 10{,}5$ N1/min. În plus, durata decompresiei, în primul caz, este de 186 minute, faţă de 74 minute în cazul al doilea. Acest lucru se datorează faptului că revenirea la presiunea atmosferică, pentru aparatul alimentat cu debit minim ($Q_{ai} = 1{,}8$ N1/min) se face după tabela de decompresie cu aer LH – 82, iar pentru aparatul alimentat cu debit $Q_{ai} = 10{,}5$ N1/min după tabela cu amestecuri supraoxigenate cu 30% oxigen. Deci, se poate concluziona că este necesară o optimizare în care trebuie luaţi în considerare următorii factori: debitul de amestec gazos injectat, natura amestecului injectat, consumul de oxigen al scafandrului, timpul efectiv de lucru sub apă şi durata revenirii la presiunea armosferică.

Dacă se defineşte randamentul scufundării ca fiind raportul dintre timpul efectiv de lucru sub apă t_e şi durata totală a scufundării t_t, care cuprinde timpul necesar atingerii adâncimii de lucru, timpul efectiv de lucru sub apă şi timpul necesar revenirii la presiunea atmosferică ($\eta_s = t_e / t_t$), atunci există următoarele situaţii:

– pentru scufundarea cu aparat de respirat sub apă cu circuit deschis, cu aer comprimat, la $t_e = 65$ minute corespunde un $t_t = 186$ minute şi deci un randament al scufundării $\eta_s = 65/186 = 0{,}35$;

– pentru scufundarea cu aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis cu amestec NITROX supraoxigenat (40% oxigen) cu debit continuu, constant, $Q_{ai} = 1{,}8$ N1/ min , la $t_e = 65$ minute corespunde un $t_t = 186$ minute şi deci un randament al scufundării $\eta_s = 65/186 = 0{,}35$. Acest randament se datorează faptului că revenire la presiunea atmosferică se face tot după tabela cu aer comprimat, ca şi în primul caz;

– pentru scufundarea cu aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec NITROX supraoxigenat (40% oxigen) cu debit continuu, constant, $Q_{ai} = 10{,}5$ N1/ min , la $t_e = 65$ minute corespunde un $t_t = 134$ minute şi deci un randament al scufundării $\eta_s = 65/134 = 0{,}48$;

– pentru scufundarea cu aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis cu amestec NITROX supraoxigenat (40% oxigen) cu debit continuu, constant, $Q_{ai} = 12{,}2$ N1/ min , la $t_e = 65$ minute corespunde un $t_t = 134$ minute şi deci un randament al scufundării $\eta_s = 65/134 = 0{,}48$. Acest randament se datorează faptului că revenirea la presiunea atmosferică, ca şi în cazul precedent, se face după tabela de decompresie cu amestec supraoxigenat cu 30% oxigen.

Din analiza datelor prezentate mai sus se poate concluziona:

– caracteristicile aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu debite de amestecuri NITROX injectate mai mari de 10 N1/min oferă un randament sporit scufundărilor, cu 37,5% mai mare decât cel oferit de aparatul de respirat sub apă cu circuit deschis;

– creşterea debitului de amestec NITROX injectat în sacul respirator Q_{ai} de la 10,5 N1/min la 12,2 N1/min, nu oferă un avantaj deosebit din punct de vedere al randamentului scufundării, ci dimpotrivă, autonomia aparatului scade cu aproximativ 13,5%;

– pentru amestec NITROX supraoxigenat (40% oxigen), debitul injectat în sacul respirator $Q_{ai} = 10,5$ N1/ min poate fi considerat acceptabil, realizându-se scufundări operaţionale până la 42 m adâncime, în deplină securitate şi cu randament sporit.

Revenind la graficele privind participaţiile volumice de oxigen din amestecul gazos al sacului respirator $r_{O_2,s}$, la diferite consumuri de oxigen $Q_{O2,c}$, funcţie de debitul amestecului NITROX injectat Q_{ai} (fig. 5.28, 5.29, 5.30 şi 5.31) şi având în vedere faptul că rezultatele experimentale s-au suprapus foarte bine cu cele teoretice, se poate extrapola această concluzie şi pentru celelalte amestecuri NITROX supraoxigenate.

Luând în considerare un consum de oxigen mediu de $Q_{O_2,c} = 1,5$ N1/ min, se pot face următoarele afirmaţii privind utilizarea amestecurilor NITROX supraoxigenate la alimentarea aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu debit continuu de amestec gazos injectat în sacul respirator:

– pentru amestec NITROX 32,5/67,5 (32,5% oxigen şi 67,5% azot), debitul de amestec injectat în sacul respirator trebuie să fie de $Q_{ai} = 18$ N1/ min, ceea ce corespunde unui ajutaj de injecţie masică cu următoarele caracteristici: diametrul minim al ajutajului $d_1 = 0,40$ mm, presiunea de amonte $p_0 = 11,73$ bar (sc. abs.) şi presiunea critică $p_{cr} = 6,2$ bar (sc. abs.). Decompresia se poate realiza fie după tabela de decompresie cu aer LH – 82, fie după o tabelă specială în care să se ţină cont de faptul că amestecul respirator la decompresie conţine cel puţin 24% oxigen;

– pentru amestec NITROX 40/60, debitul de amestec injectat în sacul respirator trebuie să fie $Q_{ai} = 16$ N1/ min, ceea ce corespunde unui ajutaj de injecţie masică cu următoarele caracteristici: diametrul minim al ajutajului $d_1 = 0,40$ mm, presiunea din amonte $p_0 = 10,59$ bar (sc. abs.) şi presiunea critică $p_{cr} = 5,6$ bar (sc. abs.). Decompresia se poate realiza după tabela cu amestecuri NITROX supraoxigenate pentru concentraţia oxigenului egală cu 30%;

– pentru amestec NITROX 50/50, debitul de amestec injectat în sacul respirator trebuie să fie $Q_{ai} = 12$ N1/ min, ceea ce corespunde unui ajutaj de injecţie masică cu următoarele caracteristici: diametrul minim al ajutajului $d_1 = 0,40$ mm, presiunea din amonte $p_0 = 8,32$ bar (sc.abs.) şi presiunea critică $p_{cr} = 4,4$ bar (sc. abs.). Decompresia se poate realiza după tabela cu amestecuri NITROX supraoxigenate pentru concentraţia oxigenului egală cu 40%;

– pentru amestec NITROX 60/40, debitul de amestec injectat în sacul respirator trebuie să fie $Q_{ai} = 10$ N1/ min, ceea ce corespunde unui ajutaj de injecţie masică cu următoarele caracteristici: diametrul minim al ajutajului $d_1 = 0,40$ mm, presiunea din amonte $p_0 = 6,81$ bar (sc. abs.) şi presiunea critică $p_{cr} = 3,6$ bar (sc. abs.).

Decompresia se poate realiza după tabela cu amestecuri NITROX supraoxigenate pentru concentraţia oxigenului egală cu 50%.

Se remarcă faptul că, folosind acelaşi tip de ajutaj de injecţie masică din punct de vedere constructiv (cu diametrul colului $d_1 = 0,40$ mm), se pot realiza debitele de amestec injectate în sacul respirator Q_{ai} necesare obţinerii diferitelor amestecuri gazoase în sacul respirator, acţionându-se numai asupra valorii presiunii din amonte de ajutaj p_0. Acest lucru este posibil deoarece reductorul de presiune ce alimentează ajutajul de injecţie masică are posibilitatea de a asigura presiuni în limitele 0 la 14 bar (sc. abs.).

Analizând, prin comparaţie, posibilitatea de pătrundere sub apă cu diferite amestecuri NITROX, într-o scufundare reală la 24 m adâncime, funcţie de autonomia maximă a aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis, se obţine situaţia prezentată în figura 5.36.

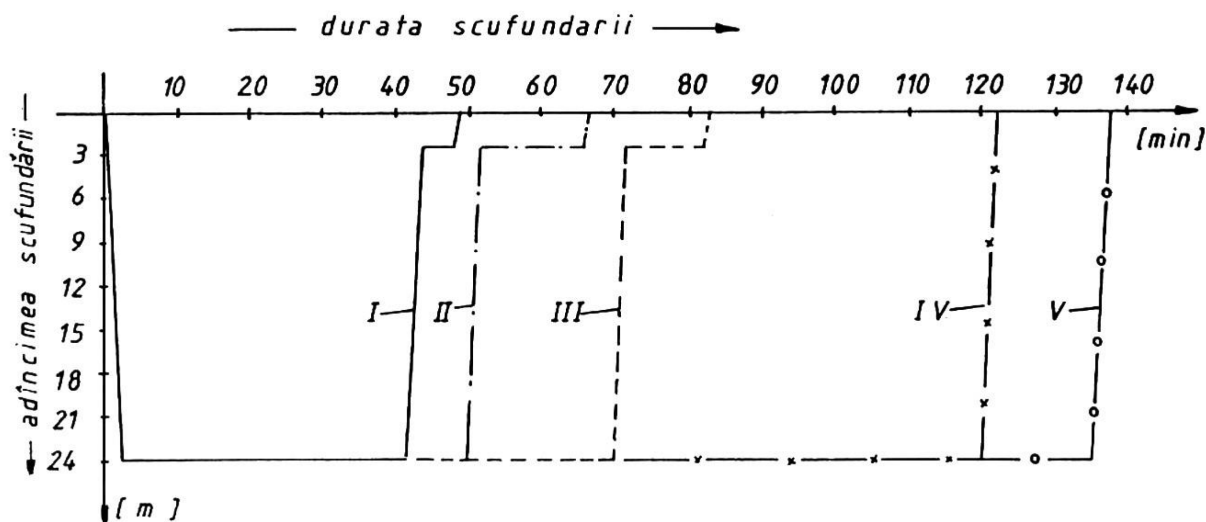


Fig. 5.36. Profilele decompresiilor după o scufundare la 24 m adâncime:

I – cu aparat de respirat sub apă cu circuit deschis, cu aer comprimat, adică amestec NITROX 21/79, cu 21% oxigen;

II – cu aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec NITROX 32,5/67,5, cu 32,5% oxigen;

III – cu aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec NITROX 40/60, cu 40% oxigen;

IV – cu aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec NITROX 50/50, cu 50% oxigen;

V – cu aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec NITROX 60/40, cu 60% oxigen.

Din analiza profilelor de decompresie prezentate în figura 5.36, se poate concluziona faptul că eficienţa scufundărilor cu aparatul studiat creşte cu 19% pentru amestec NITROX supraoxigenat 32,5/67,4 până la 221,4% pentru amestec NITROX supraoxigenat 60/40, faţă de utilizarea aparatului de respirat cu circuit deschis, cu aer comprimat. Se remarcă un randament apropiat de 100% la scufundările cu amestecuri NITROX supraoxigenate 50/50 şi 60/40, care nu necesită un timp suplimentar pentru revenirea la presiunea atmosferică.

Astfel, se poate afirma că toate calculele teoretice şi determinările experimentale legate de proiectarea şi stabilirea metodei de lucru cu aparatul de respirat sub apă studiat au fost rezolvate. Spre exemplificare, se prezintă în figura 5.37 blocul de reductoare al aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu injecţie masică constantă de amestec supraoxigenat, cu mare autonomie conceput în cadrul Centrului de Scafandri Constanţa, în colaborare cu Departamentul de Hidraulică şi Protecţia Mediului din Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti.

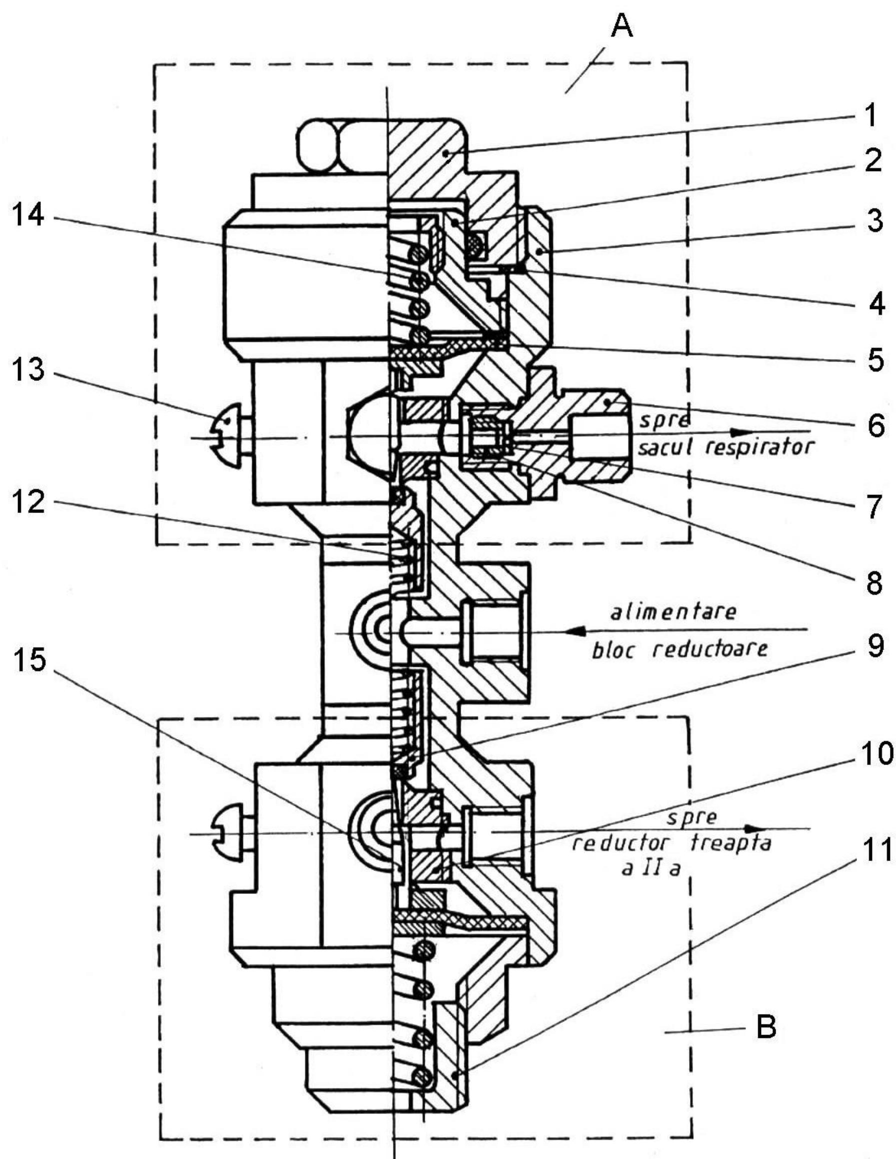


Fig. 5.37. Blocul de reductoare al aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis: 1 – capac etanş; 2 – piuliţă; 3 – corp reductoare; 4 – garnitură; 5 – membrană; 6 – racord injecţie masică; 7 – ajutaj injecţie; 8 – suport ajutaj de injecţie; 9 – clapet; 10 – scaun clapet; 11 – şurub reglare; 12 – resort de rapel; 13 – şurub de fixare; 14 – resort reglare; 15 – tijă.

Blocul de reductoare este compus din două elemente principale: reductorul de presiune treapta întâi nepilotat A cu ajutajul convergent pentru injectarea amestecului

gazos supraoxigenat în sacul respirator, prevăzut cu o piuliţă 2 pentru reglarea presiunii din aval de ajutaj şi reductorul de presiune treapta întâi pilotat de presiunea hidrostatică exterioară B pentru alimentarea reductorului treapta a doua care oferă scafandrului, în condiţii de securitate, amestec respirator "la cerere", în cazul unor eventuale defecţiuni ale sistemului, direct din buteliile de stocare, obligându-l să revină la presiunea atmosferică.

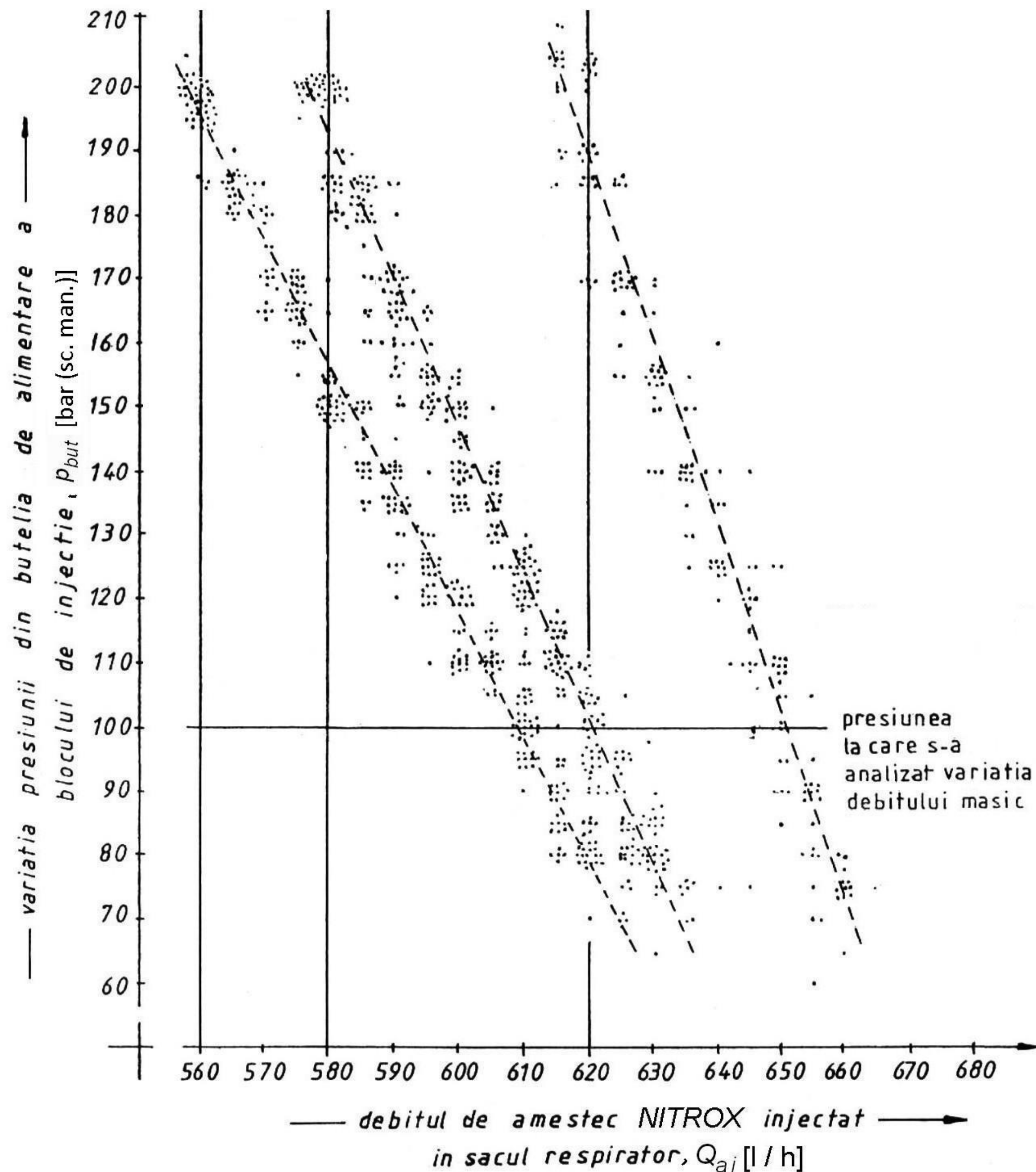


Fig. 5.38. Variaţia debitului de amestec NITROX injectat în sacul respirator Q_{ai}, funcţie de variaţia presiunii din butelia de alimentare a blocului de injecţie p_{but}. Determinări experimentale.

Sacul respirator a fost realizat cu o capacitate de 4…5 l, iar filtrele pentru reţinerea dioxidului de carbon au fost concepute astfel încât să asigure întrega autonomie oferită de cele două butelii de 4 l umplute cu amestec NITROX la 200 bar (sc. man.), cu care este dotat aparatul.

O problemă importantă, care a fost verificată experimental, este cea legată de stabilitatea sistemului proiectat: variaţia presiunii din buteliile de stocare, caracteristicile reductorului de presiune şi debitul de amestec gazos supraoxigenat către sacul respirator. Rezultatele experimentărilor sunt prezentate în figura 5.38. Au fost efectuate un număr de 118 experimentări, pentru acelaşi tip de ajutaj, dar la diferite debite de injecţie realizate prin varierea presiunii p_0 din amonte de ajutaj, astfel: 49 experimentări pentru un debit de 560 N1/h, 49 experimentări pentru un debit de 580 N1/h şi 20 experimentări pentru un debit de 620 N1/h. Experimentările au fost efectuate la presiunea atmosferică prin punerea în funcţiune a aparatului şi măsurarea, la fiecare 15 minute, a valorii presiunii din buteliile de stocare şi a debitului de amestec gazos supraoxigenat injectat spre sacul respirator, rezultatele fiind reprezentate grafic în figura 5.38. Se observă faptul că, în toate cele trei cazuri experimentate, are loc o creştere a debitului de amestec gazos injectat, pe măsură ce presiunea din buteliile de stocare scade. Astfel, la jumătate din presiunea buteliilor de stocare gaze (100 bar) apare o creştere a debitului de amestec injectat în sacul respirator cu 49 Nl/h (0,82 Nl/min) pentru debitul iniţial de 560 N1/h (9,3 Nl/min), cu 40 N1/h (0,67 N1/min) pentru debitul iniţial de 580 N1/h (9,7 Nl/min) şi cu 31 Nl/h (0,52 Nl/min) pentru debitul iniţial de 620 Nl/h (10,3 Nl/min). Deci, apare o creştere a debitului injectat în sacul respirator cu 5…9% faţă de debitul iniţial. Această creştere se pune pe seama variaţiei presiunii din amonte de ajutaj, datorată elementelor elastice din reductorul de presiune. Reductorul de presiune are în componenţă arcuri elicoidale de compresiune, calculate pentru sarcina maximă corespunzătoare presiunii la ieşire de 14 bar (sc. man.), deci cu o plajă între 0 şi 14 bar (sc. man.). Deoarece caracteristica reală a arcului nu este liniară, iar rigiditatea lui este direct proporţională cu sarcina, atunci este explicabilă creşterea presiunii la sarcini exterioare pe arc, mici.

Ar trebui calculate reductoare de presiune corespunzătoare caracteristicilor fiecărui ajutaj de injecţie în parte, dar soluţia adoptată de specialiştii Centrului de Scafandri Constanţa a simplificat şi universalizat reductorul din punct de vedere constructiv, ţinând cont de creşterea relativ mică a debitului injectat în sacul respirator, care nu afectează funcţionarea corectă a aparatului.

5.3.2.3. Concepţia aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis, de mare autonomie, pentru scufundări de sistem

O variantă a aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis, conceput şi proiectat prin colaborarea dintre specialiştii din Centrul de Scafandri Constanţa şi Departamentul de Hidraulică şi Protecţia Mediului din Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti, se referă la un aparat autonom pentru scufundări de sistem, care este tot un aparat de scufundare cu circuit semiînchis, cu autonomie sporită, ce permite realizarea unor intervenţii subacvatice cu ieşirea din turele de scufundare presurizate sau din camera hiperbarică a unui minisubmarin şi revenirea scafandrilor în interiorul aceloraşi incinte. Schema de principiu a acestui aparat este prezentată în figura 5.39. Folosirea acestui aparat permite scafandrului o îndepărtare mare de mijlocul suport imersat de până la 100…150 m comparativ cu sistemul actual, cu alimentare din mijlocul imersat prin "ombilical" (un ansamblu format din furtun de alimentare cu amestec respirator, furtun de alimentare cu apă caldă pentru încălzire şi cablu de comunicaţii) de numai 25…30 m.

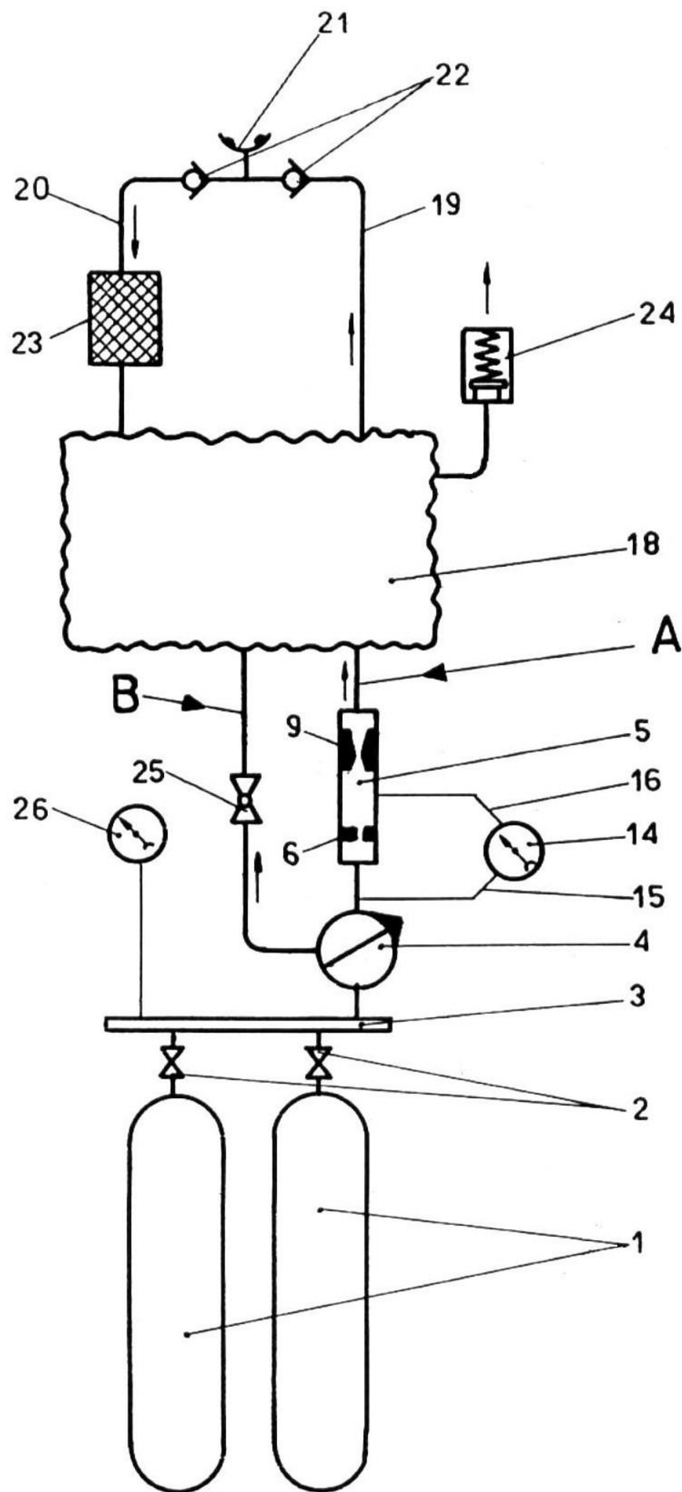


Fig. 5.39. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis pentru scufundări de sistem: 1 – baterie de butelii; 2 – robineţi înaltă presiune; 3 – distribuitor amestec respirator; 4 – reductor de presiune treapta întâi nepilotat; 5 – bloc de injecţie şi control; 6 – microajutaj cilindric pentru regim subsonic; 9 – microajutaj convergent – divergent; 14 – manometru diferenţial; 15, 16 – furtunuri pentru manometru; 18 – sac respirator; 19 – furtun inspiraţie; 20 – furtun expiraţie; 21 – muştiuc; 22 – supape unisens; 23 – cartuş filtrant pentru CO_2; 24 - supapă evacuare; 25 – vană de spălare; 26 – manometru control presiune.

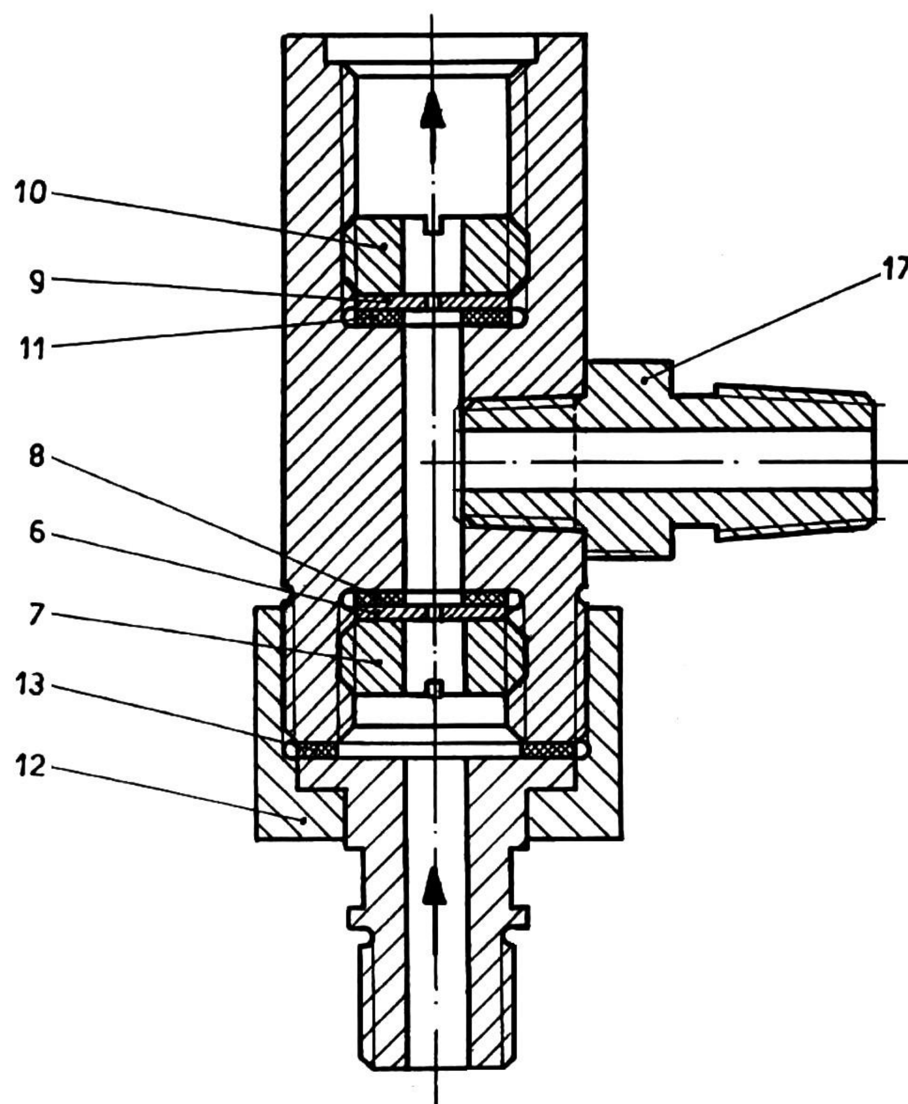


Fig. 5.40. Blocul de injecţie al aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis pentru scufundări de sistem: 6 – microajutaj pentru regim subsonic; 7 – şurub de fixare; 8 – garnitură de etanşare; 9 – microajutaj convergent – divergent; 10 – şurub de fixare; 11 – garnitură de etanşare; 12 – racord olandez; 13 – garnitură de etanşare; 17 – ştuţ de legătură.

Aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis pentru scufundări de sistem este alcătuit dintr-o baterie de butelii 1, fiecare butelie fiind prevăzută cu câte un robinet de înaltă presiune 2 de admisie a amestecului respirator către un distribuitor 3. Distribuitorul 3 asigură alimentarea cu amestec gazos binar a două circuite: un circuit principal de injecţie A şi un circuit de umplere şi spălare B.

Circuitul principal de injecţie A este alcătuit, în primul rând, dintr-un reductor de presiune treapta întâi nepilotat 4, având ca referinţă presiunea atmosferică. Acest reductor de presiune are rolul de a reduce presiunea de la nivelul presiunii înalte existente în bateria de butelii, la nivelul presiunii medii necesare alimentării unui bloc de injecţie şi control 5 a cărui execuţie este prezentată în figura 5.40.

Blocul de injecţie şi control este prevăzut cu un microajutaj cilindric lucrând în domeniul subsonic 6, având o secţiune s şi fixat prin intermediul unui şurub de fixare 7. Etanşarea este realizată cu garnitura 8. Blocul de injecţie şi control este prevăzut şi cu un microajutaj convergent – divergent 9, lucrând în domeniul sonic, critic, în porţiunea divergentă a microajutajului având o secţiune minimă s_1 şi fixat de bloc prin intermediul şurubului de fixare 10. Etanşarea se realizează cu garnitura 11. Prinderea blocului de injecţie de reductorul de presiune se realizează prin intermediul unui racord olandez 12, etanşarea fiind realizată de garnitura 13.

Diferenţa de presiune Δp dintre presiunea $p_0 + \Delta p$ care se stabileşte în amonte de microajutajul cilindric 6 şi presiunea p_0 care se stabileşte în aval de microajutajul cilindric, este indicată la un manometru diferenţial 14 prin intermediul unor furtunuri 15 şi respectiv 16 (fig. 5.39). Presiunea din aval de ajutajul cilindric este captată prin ştuţul 17 (fig. 5.40).

Lucrând în secţiunea minimă în regim sonic, microajutajul convergent – divergent realizează livrarea unui debit masic de amestec gazos binar constant în sacul respirator 18. Inspiraţia şi expiraţia din şi respectiv către sacul respirator se realizează prin intermediul unui circuit de respiraţie alcătuit din furtunurile 19 şi 20, racordate la piesa bucală 21 prevăzută cu două supape unisens 22 (fig. 5.39). Amestecul expirat către sacul respirator trece în prealabil, printr-un cartuş filtrant 23, care asigură reţinerea dioxidului de carbon. Surplusul de amestec gazos este eliminat prin supapa de evacuare 24.

Circuitul de umplere şi de spălare B asigură completarea cu amestec gazos binar a sacului respirator înainte de începerea scufundării. Circuitul B este alimentat la medie presiune prin intermediul reductorului de presiune treapta întâi 4 şi este prevăzut cu o vană 25 de tipul "închis - deschis" cu acţionare manuală.

Aparatul de respirat sub apă este echipat cu un manometru de înaltă presiune 26 pentru controlul presiunii amestecului binar stocat în butelii.

Microajutajul cilindric 6 asigură măsurarea şi controlul debitului din circuitul principal de injecţie, realizând o cădere de presiune Δp care, în domeniul subsonic, este funcţie de debitul masic injectat, $Q^i_{m,a}$, conform relaţiei:

$$\Delta p = \frac{p_0}{\left(\dfrac{1+\sqrt{1+4\dfrac{\left(Q^i_{m,a}\right)^2}{p_0\, s^2\, g^2}\, R_{a,i}\, T_0\, \dfrac{k_{a,i}-1}{2\,k_{a,i}}}}{2}\right)^{\frac{k_{a,i}}{1-k_{a,i}}} + p_0}, \qquad (5\text{-}77)$$

unde p_0 şi T_0 sunt presiunea absolută şi respectiv temperatura absolută din aval de microajutajul cilindric 6, $R_{a,i}$ este constanta amestecului gazos injectat, $k_{a,i}$ este exponentul izentropic corespunzător amestecului injectat, g este acceleraţia gravitaţională, iar s reprezintă aria secţiunii orificiului microajutajului cilindric 6.

Microajutajul convergent – divergent 9, atingând viteza sunetului şi deci starea critică în zona secţiunii minime, asigură injectarea în regim permanent a unui debit masic pe toată durata scufundării. Valoarea debitului masic injectat în regim constant, $Q^i_{m,a}$, este dată de relaţia corespunzătoare curgerii izentropice:

$$Q^i_{m,a} = s_1 \left(\frac{2}{k_{a,i}+1} \right)^{\frac{1}{k_{a,i}-1}} \sqrt{\frac{2k_{a,i}}{k_{a,i}+1}} \frac{p_0 g}{\sqrt{R_{a,i} T_0}}, \qquad (5\text{-}78)$$

unde s_1 este aria secţiunii minime a microajutajului convergent – divergent, iar p_0 şi T_0 sunt presiunea absolută şi respectiv temperatura absolută din amonte de microajutajul convergent – divergent.

Dimensiunile microajutajului convergent – divergent şi stabilirea presiunii p_0 din amonte de aceasta trebuie astfel alese încât pentru o presiune p_e din avalul microajutajului convergent – divergent să se atingă regimul sonic şi deci starea critică caracterizată prin presiunea critică p_{cr} în secţiunea minimă a microajutajului convergent – divergent, precum şi un regim subsonic în divergentul aceluiaşi ajutaj. Trebuie menţionat faptul că presiunea p_e din avalul microajutajului convergent-divergent poate fi considerată, cu o foarte bună aproximaţie, ca fiind egală cu presiunea amestecului gazos din sacul respirator şi cu presiunea exterioară corespunzătoare adâncimii de imersie la nivelul sacului respirator.

Aceasta înseamnă că, pentru microajutajul convergent – divergent, din mulţimea curbelor de funcţionare, variaţia raportului de presiuni p / p_0 în lungul microajutajului, unde p este presiunea în diferite secţiuni ale acestuia, trebuie să aibă loc după curba I, Cr, II din graficul general de variaţie a raportului de presiuni p / p_0 în lungul unui microajutaj convergent – divergent, prezentat în figura 5.41.

Această funcţionare are loc atunci când presiunea p_e din aval de microajutajul convergent – divergent atinge valoarea $p_e^{'}$, iar raportul de presiuni valoarea $p_e^{'} / p_0$. Din analiza graficului prezentat în figura 5.41 se observă că valoarea presiunii p_0 din amonte de microajutajul convergent – divergent este foarte apropiată de valoarea presiunii $p_e^{'}$ din aval de acelaşi microajutaj, aceasta conducând, în final, la o utilizare maximă a amestecului gazos stocat în butelii, funcţionarea normală a aparatului având loc până ce presiunea amestecului gazos din butelii devine doar cu puţin mai ridicată decât presiunea echivalentă corespunzătoare adâncimii de scufundare la nivelul sacului respirator.

În acest fel se asigură, implicit, pe întreaga perioadă a scufundării, injectarea unui debit masic constant de amestec gazos şi deci a unui debit masic constant de oxigen, valoarea debitului asigurând acoperirea deficitului de oxigen din sacul respirator, rezultat din procesele metabolice.

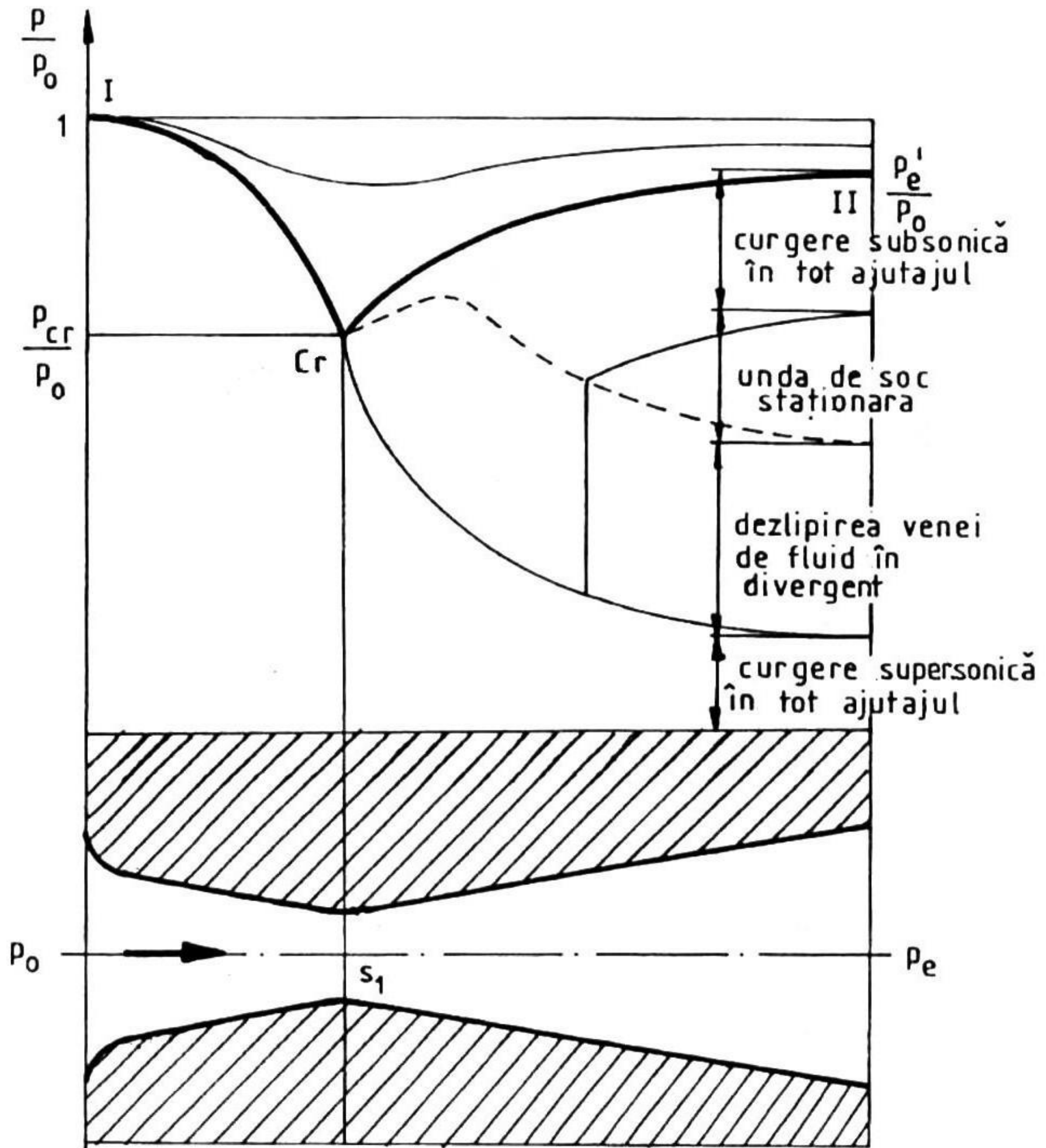


Fig. 5.41. Variaţia raportului de presiuni p / p_0 în lungul unui ajutaj convergent – divergent.

Prin realizarea acestui aparat se obţin următoarele avantaje:

– utilizare pentru scufundări autonome de sistem, cu ieşirea scafandrului din turelă, minisubmarin sau laborator submers, fără cablu "ombilical", cu o utilizare maximă a amestecului gazos stocat în butelii;

– autonomie sporită în scufundarea de sistem;

– randament ridicat şi siguranţă în funcţionare;

– control permanent al funcţionării pe întreaga durată a scufundării;

– utilizare atât pentru scufundări la adâncime medie cât şi pentru scufundări la mare adâncime.

5.3.3. CONCEPŢIA ŞI CALCULUL APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT MIXT

Aparatele de respirat sub apă cu circuit mixt sunt acele aparate care funcţionează, pe măsură ce se pătrunde în apă, în cel puţin două moduri:

– iniţial în circuit închis, iar apoi în circuit deschis;

– iniţial în circuit închis, iar apoi în circuit semiînchis.

Cea mai reuşită combinaţie, în special pentru aplicaţii militare, este funcţionarea iniţială în circuit închis, cu oxigen, până la adâncimi de 6,5…7 m şi apoi în circuit semiînchis cu amestec NITROX supraoxigenat, la adâncimi mai mari. Aceste aparate oferă o autonomie mare, adăncimi de lucru relativ mari, timpi de decompresie scăzuţi şi o bună siguranţă în funcţionare.

5.3.3.1. Concepţia aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt

În continuare, este prezentat un aparat de respirat sub apă cu circuit mixt (circuit închis cu oxigen şi circuit semiînchis cu amestec NITROX supraoxigenat) cu trei variante constructive:

– Varianta 1: oxigen şi amestec NITROX supraoxigenat injectat în sacul respirator;

– Varianta 2: oxigen livrabil "la cerere" şi amestec NITROX supraoxigenat injectat în sacul respirator;

– Varianta 3: oxigen şi amestec NITROX supraoxigenat livrabile "la cerere" în sacul respirator.

Schemele de principiu ale aparatelor de respirat sub apă cu circuit mixt, variantele 1, 2 şi 3 sunt prezentate în figurile 5.42 (varianta 1) şi figura 5.43 (variantele 2 şi 3), legenda pentru aceste figuri fiind următoarea:

B1 - butelie amestec (4 l la 200 bar);
R1 - robinet butelie amestec;
MIP1 - manometru înaltă presiune pentru amestec;
RPN1 - reductor de presiune treapta întâi nepilotat pentru amestec;
RPP1 - reductor de presiune treapta întâi pilotat pentru amestec;
MA1 - mecanism de alimentare cu amestec;
MS1 - mecanism de spălare cu amestec;
AJC1 - ajutaj de compensare pentru amestec;
AJS1 - ajutaj de spălare cu amestec;
AJI1 - ajutaj de injecţie cu amestec;
MD1 - mecanism de descărcare pentru amestec;
R3C - robinet cu trei căi pentru amestec;
BP1 - by-pass pentru amestec;
B2 - butelie pentru oxigen (1 l la 200 bar);
R2 - robinet butelie oxigen;
MIP2 - manometru înaltă presiune pentru oxigen;
RPN2 - reductor de presiune treapta întâi nepilotat pentru oxigen;
RPP2 - reductor de presiune treapta întâi pilotat pentru oxigen;
MA2 - mecanism de alimentare cu oxigen;
MS2 - mecanism de spălare cu oxigen;
AJC2 - ajutaj de compensare pentru oxigen;

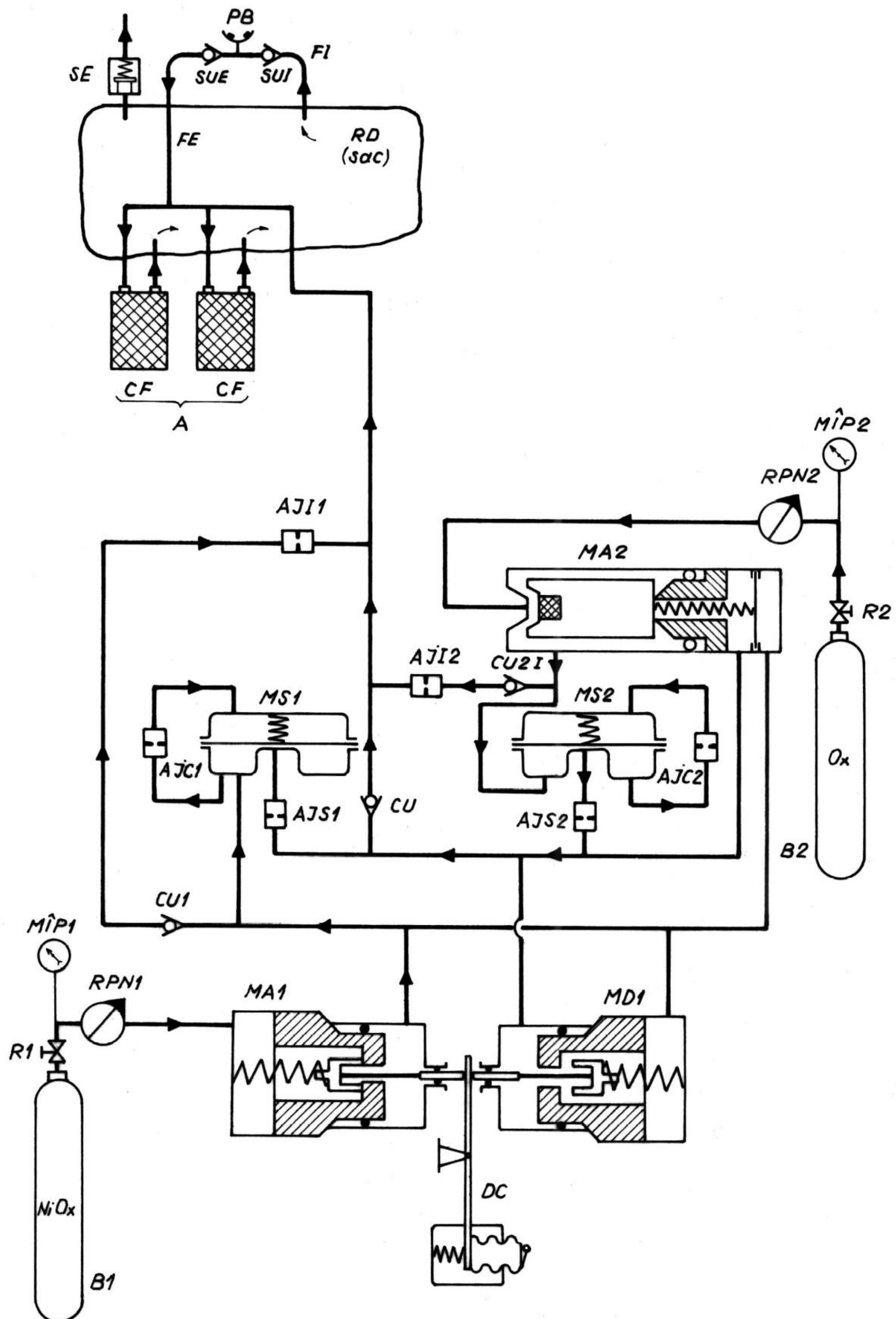


Fig. 5.42. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt, varianta 1: NITROX – injectat şi Oxigen – injectat.

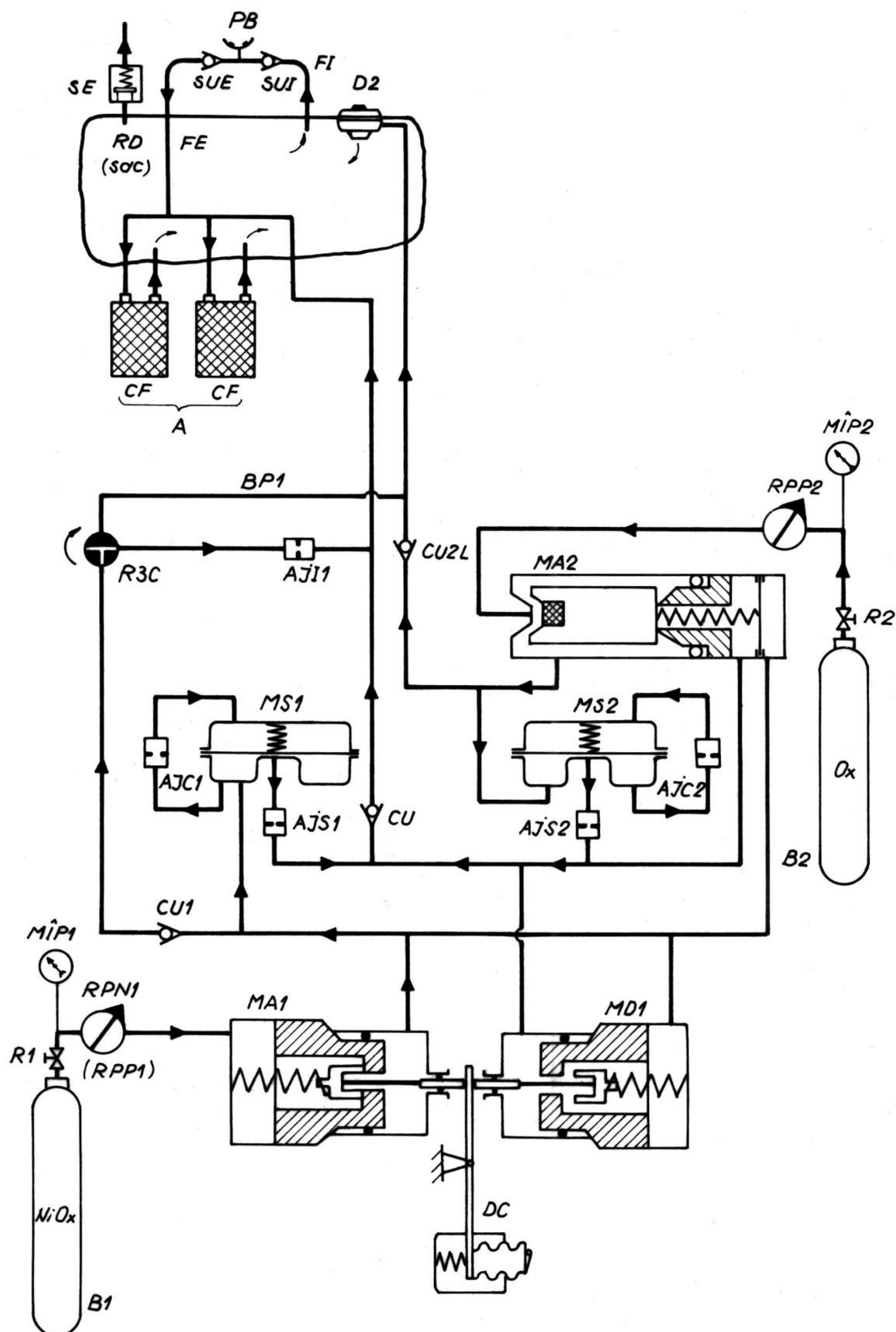


Fig. 5.43. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt, varianta 2: NITROX – injectat şi Oxigen – la cerere; varianta 3: NITROX – la cerere şi Oxigen – la cerere.

AJS2 - ajutaj de spălare cu oxigen;
D2 - reductor de presiune treapta a doua (detentor) pentru oxigen;
DC - dispozitiv de comutare;
RD - rezervor deformabil (sac respirator);
FI - furtun de inspiraţie;
FE - furtun de expiraţie;
PB - piesă bucală;
SUI - supapă unisens inspiraţie;
SUE - supapă unisens expiraţie;
A - absorber de dioxid de carbon;
CF - cartuşe filtrante;
SE - supapă de evacuare;
CU, CU1, CU2I, CU2L - clapeţi unisens.

Conceperea, cercetarea, proiectarea şi realizarea aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt s-au impus ca urmare a necesităţii efectuării unor scufundări autonome, în scopuri militare, presupunând durate de scufundare relativ mari, la adâncimi până la 40 m, asociate cu randamente ale scufundării ridicate prin reducerea substanţială a timpului de revenire la presiunea atmosferică a scafandrului. Aparatul existent până la data studierii acestor aparate era cu circuit închis cu oxigen şi debit livrabil "la cerere", care nu permite decât scufundări până la adâncimea de 6,5…7 m.

Aparatul studiat este astfel conceput încât să furnizeze scafandrului oxigen pur pe primul interval de scufundare (între suprafaţă şi 6,5…7 m adâncime), după care amestec NITROX supraoxigenat până la adâncimea maximă de intervenţie. Trecerea, în timpul coborârii, de la funcţionarea cu oxigen pur la funcţionarea cu amestec NITROX supraoxigenat, se face la o adâncime notată cu h_{tr} (adâncime de trecere). La revenirea către suprafaţă, la adâncimea h_{tr} are loc o nouă trecere, de la funcţionarea aparatului cu amestec NITROX supraoxigenat la funcţionarea cu oxigen. Această adâncime de trecere h_{tr}, este astfel aleasă încât să fie cât mai mare posibilă, pentru a obţine timpi de descompresie reduşi la minim, dar limitată pentru evitarea crizei hiperoxice. Astfel, la 7 m scafandrul poate respira timp îndelungat oxigen pur, dar poate face şi incursiuni de scurtă durată până la 18 m adâncime, fără riscul apariţiei crizei hiperoxice. Deci, h_{tr} se poate stabili între 7 şi 18 m adâncime.

Deoarece schemele aparatului, în cele trei variante, au marea majoritate a elementelor comune, se vor prezenta unitar, iar pentru fiecare variantă în parte se vor prezenta elementele specifice. Aparatele sunt alcătuite din următoarele componente principale:

– butelia de amestec binar B1 conţinând amestec NITROX supraoxigenat, care alimentează prin intermediul robinetului R1 reductorul de presiune treapta întâi nepilotat RPN1 în cazul variantelor 1 şi 2 şi respectiv, reductorul de presiune treapta întâi pilotat RPP1 în cazul variantei 3;

– reductorul de presiune treapta întâi nepilotat pentru amestec RPN1 pentru variantele 1 şi 2, sau reductorul de presiune treapta întâi pilotat pentru amestec RPP1 pentru varianta 3, care reduc presiunea amestecului NITROX supraoxigenat de la nivelul presiunii înalte existente în butelie la nivelul presiunii necesare alimentării ajutajelor de injecţie AJI1, de spălare AJS1 şi de compensare AJC1 în cazul

variantelor 1 şi 2, sau la nivelul presiunii de alimentare a detentorului D2 precum şi a ajutajelor AJS1 şi AJC1 în cazul variantei 3. Reductorul de presiune treapta întâi nepilotat RPN1 asigură la ieşire o presiune constantă indiferent de adâncimea scufundării, iar reductorul de presiune treapta întâi pilotat RPP1 asigură la ieşire o suprapresiune constantă faţă de presiunea corespunzătoare adâncimii;

– mecanismul de alimentare cu amestec NITROX supraoxigenat MA1, care are rolul de a închide (în cazul funcţionării aparatului cu oxigen pur) şi de a deschide (în cazul funcţionării aparatului cu amestec NITROX supraoxigenat) alimentarea ajutajelor AJI1, AJS1 şi AJC1 sau detentorului D2 şi ajutajelor AJS1 şi AJC1, cu amestec gazos. Mecanismul MA1 se deschide la coborârea scafandrului sub adâncimea h_{tr} şi se închide, din nou, la urcare;

– ajutajul de injecţie cu amestec AJI1 existent numai la variantele 1 şi 2 şi care asigură injecţia către sacul respirator RD a unui debit masic constant de amestec NITROX supraoxigenat, independent de adâncimea de imersie. Ajutajul AJI1 este astfel alimentat încât lucrează în regim critic pe toată durata scufundării cu amestec;

– ajutajul de spălare cu amestec AJS1 asigură spălarea sacului respirator RD cu amestec NITROX supraoxigenat. Spălarea are loc cu un debit masic constant de amestec, un timp predeterminat, astfel încât întregul sac să fie golit de oxigenul pur şi să fie umplut cu amestec respirator atunci când scafandrul coboară sub adâncimea h_{tr}. Ajutajul de spălare lucrează în regim critic la debit masic blocat;

– mecanismul de spălare cu amestec MS1 permite alimentarea ajutajului de spălare AJS1, timpul de spălare fiind asigurat prin temporizarea deschiderii mecanismului cu ajutorul ajutajului de compensare AJC1;

– ajutajul de compensare pentru amestec AJC1 asigură deschiderea ventilului mecanismului MS1 până când se produce compensarea presiunii în compartimentul superior al acestuia. Acest ajutaj lucrează la început în regim critic, apoi în regim necritic, subsonic;

– butelia de oxigen B2 alimentează, prin intermediul robinetului R2, reductorul de presiune treapta întâi nepilotat RPN2 în cazul variantei 1 şi respectiv reductorul de presiune treapta întâi pilotat RPP2 în cazul variantelor 2 şi 3;

– reductorul de presiune treapta întâi nepilotat pentru oxigen RPN2 pentru varianta 1, sau reductorul de presiune treapta întâi pilotat pentru oxigen RPP2 pentru variantele 2 şi 3, care reduc presiunea oxigenului de la nivelul presiunii înalte din butelie la nivelul presiunii necesare alimentării ajutajelor de injecţie AJI2, de spălare AJS2 şi de compensare AJC2 în cazul variantei 1, sau la nivelul presiunii de alimentare a detentorului D2 precum şi a ajutajelor AJS2 şi AJC2 în cazul variantelor 2 şi 3. Reductorul de presiune treapta întâi nepilotat asigură la ieşire o presiune constantă indiferent de adâncimea scufundării, iar reductorul de presiune treapta întâi pilotat asigură la ieşire o suprapresiune constantă faţă de presiunea corespunzătoare adâncimii;

– mecanismul de alimentare cu oxigen MA2, care are rolul de a deschide în cazul funcţionării aparatului cu oxigen pur şi de a închide, în cazul funcţionării aparatului cu amestec NITROX supraoxigenat, alimentarea ajutajelor AJI2, AJS2 şi AJC2 sau a detentorului D2 şi ajutajelor AJS2 şi AJC2 cu oxigen pur. Mecanismul MA2 este deschis în timpul coborârii scafandrului până la adâncimea h_{tr}, peste această adâncime se închide, deschizându-se din nou la urcare;

– ajutajul de injecţie cu oxigen AJI2 existent numai la varianta 1 şi care asigură injecţia către sacul respirator a unui debit masic constant de oxigen, independent de adâncimea scufundării. Ajutajul este astfel alimentat încât lucrează în regim critic pe toată durata scufundării cu oxigen pur;

– ajutajul de spălare cu oxigen AJS2 asigură spălarea sacului respirator cu oxigen pur. Spălarea are loc cu un debit masic constant de oxigen, un timp predeterminat, astfel încât întregul sac să fie golit de amestec şi umplut cu oxigen (atunci când scafandrul pleacă de la suprafaţă – golirea de aer şi atunci când scafandrul se ridică la adâncimea h_{tr}). Ajutajul de spălare lucrează în regim critic;

– mecanismul de spălare cu oxigen MS2 permite alimentarea ajutajului de spălare AJS2, timpul de spălare fiind asigurat prin temporizarea deschiderii mecanismului cu ajutorul ajutajului de compensare AJC2;

– ajutajul de compensare pentru oxigen AJC2 asigură deschiderea ventilului mecanismului MS2 până când se produce compensarea presiunii în compartimentul superior al mecanismului. Acest ajutaj lucrează la început în regim critic, apoi în regim necritic, subsonic;

– mecanismul de descărcare a amestecului MD1, care are rolul de a descărca amestecul NITROX supraoxigenat aflat sub presiune în anumite porţiuni ale circuitelor, atunci când are loc trecerea de la funcţionarea aparatului cu amestec la funcţionarea cu oxigen pur;

– robinetul cu trei căi pentru amestec R3C, care permite comutarea pe o nouă poziţie, opreşte alimentarea cu amestec a ajutajului de injecţie AJI1 asigurând, în schimb, alimentarea cu amestec a detentorului D2 prin intermediul conductei de by-pass BP1, obţinându-se prin această manevră funcţionarea aparatului în varianta 3, caracterizată prin livrarea de amestec NITROX supraoxigenat către sacul respirator "la cerere";

– clapeţii unisens CU, CU1, CU2I şi CU2L având rolul de a izola circuitele de amestec NITROX supraoxigenat de circuitele de oxigen;

– dispozitivul de comutare DC, care are rolul de a comuta aparatul din regim de funcţionare cu oxigen pur la regim de funcţionare cu amestec NITROX supraoxigenat şi invers, prin deschiderea clapetului aferent mecanismului MD1 şi, respectiv invers. Această comutare are loc atât în timpul coborârii scafandrului (de la oxigen la amestec NITROX supraoxigenat), cât şi în timpul ridicării acestuia (de la amestec NITROX supraoxigenat la oxigen), la adâncimea h_{tr} . Comutarea are loc automat, comandată de presiunea hidrostatică;

– celelalte elemente ale aparatului (sac respirator şi echipamente aferente) sunt similare cu cele descrise pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit închis şi semiînchis în paragrafele 5.3.1 şi 5.3.2.

Modul de funcţionare al aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt este următorul:

– se deschid robinetele R1 şi R2, alimentându-se mecanismele MA1 şi MA2. În această situaţie, clapetul mecanismului de alimentare cu amestec NITROX supraoxigenat MA1 este închis, circuitul de amestec rămânând în aşteptare;

– sub acţiunea presiunii oxigenului de după reductorul de presiune pentru oxigen se deschide clapetul mecanismul de alimentare cu oxigen. Astfel, se asigură

alimentarea cu oxigen a ajutajelor şi detentorului corespunzătoare variantelor prezentate;

– sub acţiunea presiunii oxigenului de după reductor, membrana aferentă mecanismului de spălare cu oxigen MS2 se ridică deschizând accesul oxigenului către ajutajul AJS2 realizându-se, în acest fel, spălarea cu un debit masic de oxigen constant până când ajutajul de compensare AJC2 asigură în compartimentul superior o presiune suficientă, care împreună cu acţiunea resortului să conducă la coborârea membranei şi la oprirea alimentării cu oxigen a ajutajului de spălare AJS2. În acest moment, spălarea sacului respirator cu oxigen se încheie. Totodată, se asigură şi alimentarea cu oxigen a ajutajului de injecţie AJI2 în varianta 1, sau a detentorului D2 în variantele 2 şi 3;

– în cazul variantei 1, ajutajul de injecţie AJI2 asigură injecţia permanentă a unui debit masic constant de oxigen, către sacul respirator;

– odată deschise robinetele R1 şi R2, după efectuarea spălării sacului respirator cu oxigen, aparatul este gata pentru pătrunderea sub apă. Din acesta se poate respira oxigen pur în circuit semiînchis (în cazul variantei 1) deficitul de oxigen fiind compensat de ajutajul AJI2 prin injectarea de oxigen către sacul respirator, sau în circuit închis (în variantele 2 şi 3) deficitul de oxigen fiind compensat "la cerere" prin detentorul treapta a doua D2. Acest regim de funcţionare se păstrează până la adâncimea de trecere h_{tr} ce poate fi stabilită şi reglată funcţie de tehnologia de scufundare;

– atunci când se depăşeşte adâncimea de trecere h_{tr}, se deschide clapetul mecanismului de alimentare cu amestec MA1, care acţionează pneumatic asupra mecanismului de alimentare cu oxigen MA2 conducând la blocarea alimentării cu oxigen şi asigurând, totodată, alimentarea cu amestec NITROX supraoxigenat a ajutajelor de injecţie AJT1, de spălare AJS1 şi de compensare AJC1 în cazul variantelor 1 şi 2, sau a detentorului D2 şi a ajutajelor de spălare şi de compensare în cazul variantei 3;

– sub acţiunea presiunii amestecului gazos de după reductorul de presiune pentru amestec, membrana aferentă mecanismului de spălare MS1 se ridică deschizând accesul amestcului către ajutajul AJS1 realizându-se, în acest fel, spălarea sacului cu un debit masic constant de amestec, până când ajutajul de compensare AJC1 asigură în compartimentul superior o presiune suficientă, care împreună cu acţiunea resortului să conducă la coborârea membranei şi la oprirea alimentării cu amestec a ajutajului de spălare AJS1. În acest moment, spălarea sacului respirator cu amestec NITROX supraoxigenat se încheie. Totodată, se asigură şi alimentarea cu amestec a ajutajului de injecţie AJI1 în variantele 1 şi 2, sau alimentarea detentorului D2 în varianta 3 (poziţie corespunzătoare a robinetului cu trei căi);

– în cazul variantelor 1 şi 2, ajutajul de injecţie AJI1 asigură injectarea permanentă a unui debit masic de amestec constant către sacul respirator;

– în varianta 3, detentorul D2 va livra amestec "la cerere" către sacul respirator;

– după efectuarea spălării sacului cu amestec, din aparat se poate respira amestec NITROX supraoxigenat în circuit semiînchis (în cazul variantelor 1 şi 2) deficitul de oxigen fiind compensat de ajutajul AJI1 prin injecţia de amestec către sacul respirator, sau în circuit închis (în cazul variantei 3) deficitul de oxigen fiind compensat prin livrare "la cerere" de amestec către detentorul D2.

Acest regim de funcţionare se păstrează până la adâncimea maximă de lucru pe toată durata scufundării sub adâncimea h_{tr};

– atunci când, prin revenirea la suprafaţă, scafandrul urcă deasupra adâncimii h_{tr}, se deschide clapetul mecanismului MA1 blocându-se alimentarea cu amestec a aparatului şi se deschide clapetul mecanismului MD1 asigurându-se descărcarea circuitelor de amestec sub presiune. Odată descărcarea făcută, clapetul mecanismului de alimentare cu oxigen MA2 se poate deschide din nou sub acţiunea presiunii oxigenului de după reductorul de presiune pentru oxigen, asigurând din nou spălarea sacului cu oxigen şi în continuare, alimentarea acestuia cu oxigen pentru compensarea deficitului de oxigen rezultat din consumul metabolic;

– în continuare, funcţionarea aparatului cu oxigen în timpul revenirii la presiunea atmosferică este asemănătoare aparatului cu oxigen prezentată anterior, în cazul coborârii.

Presiunile amestecului NITROX supraoxigenat şi oxigenului după reductoarele de presiune treapta întâi pilotate şi nepilotate, trebuie să satisfacă condiţiile unei bune şi sigure funcţionări a circuitelor de compensare, spălare, injecţie şi livrare "la cerere", condiţii rezultate din calculele gazodinamice.

5.3.3.2. Calculul gazodinamic al circuitelor aferente aparatelor de respirat sub apă cu circuit mixt

Studiul privind calculul gazodinamic al circuiteor aferente aparatelor de respirat sub apă cu circuit mixt, conform schemelor de principiu prezentate în figurile 5.42 şi 5.43 a fost efectuat conform modelelor matematice prezentate anterior.

În figurile 5.44 şi 5.45 sunt arătate schemele simplificate ale aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt, variantele 1 şi respectiv 2, necesare calculului gazodinamic al circuitelor aferente.

În figurile 5.46, 5.47 şi 5.48 sunt prezentate alcătuirea, schema de calcul şi respectiv caracteristicile termodinamice ale amestecului NITROX pentru circuitele de compensare, spălare şi injecţie masică aferente aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt, variantele 1 şi 2.

În figurile 5.49, 5.50 şi 5.51 sunt prezentate alcătuirea, schema de calcul şi respectiv caracteristicile termodinamice ale oxigenului pentru circuitele de compensare, spălare şi injecţie masică aferente apartului de respirat sub apă cu circuit mixt, varianta 1.

În figurile 5.52, 5.53 şi 5.54 sunt prezentate alcătuirea, schema de calcul şi respectiv caracteristicile termodinamice ale oxigenului pentru circuitele de compensare, spălare şi livrare "la cerere" aferente aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt, variantele 2 şi 3.

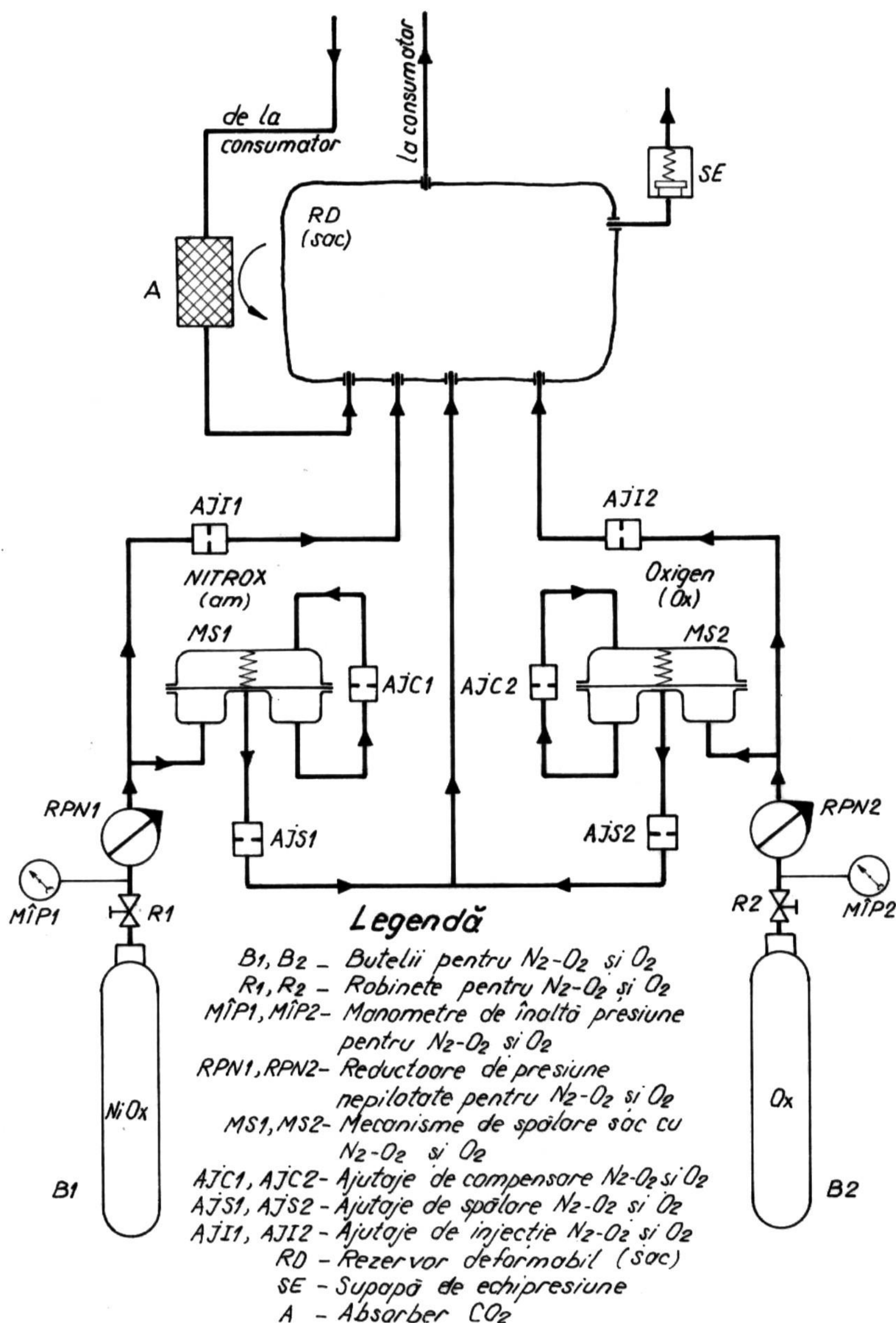


Fig. 5.44. Schema simplificată a aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt, cu circuitele de compensare, spălare şi injecţie masică pentru varianta 1.

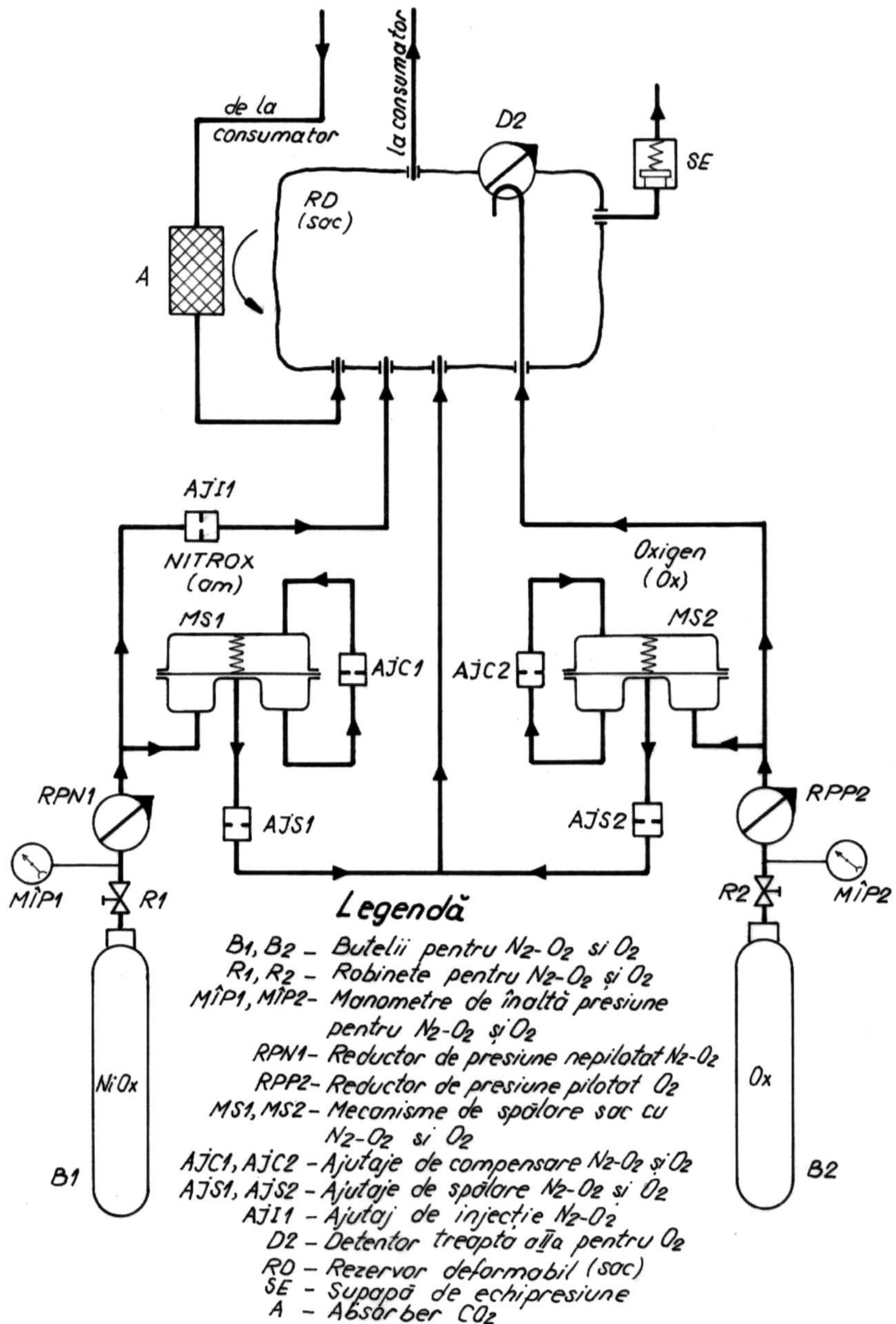


Fig. 5.45. Schema simplificată a aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt, cu circuitele de compensare, spălare, injecţie masică şi livrare la cerere, pentru varianta 2.

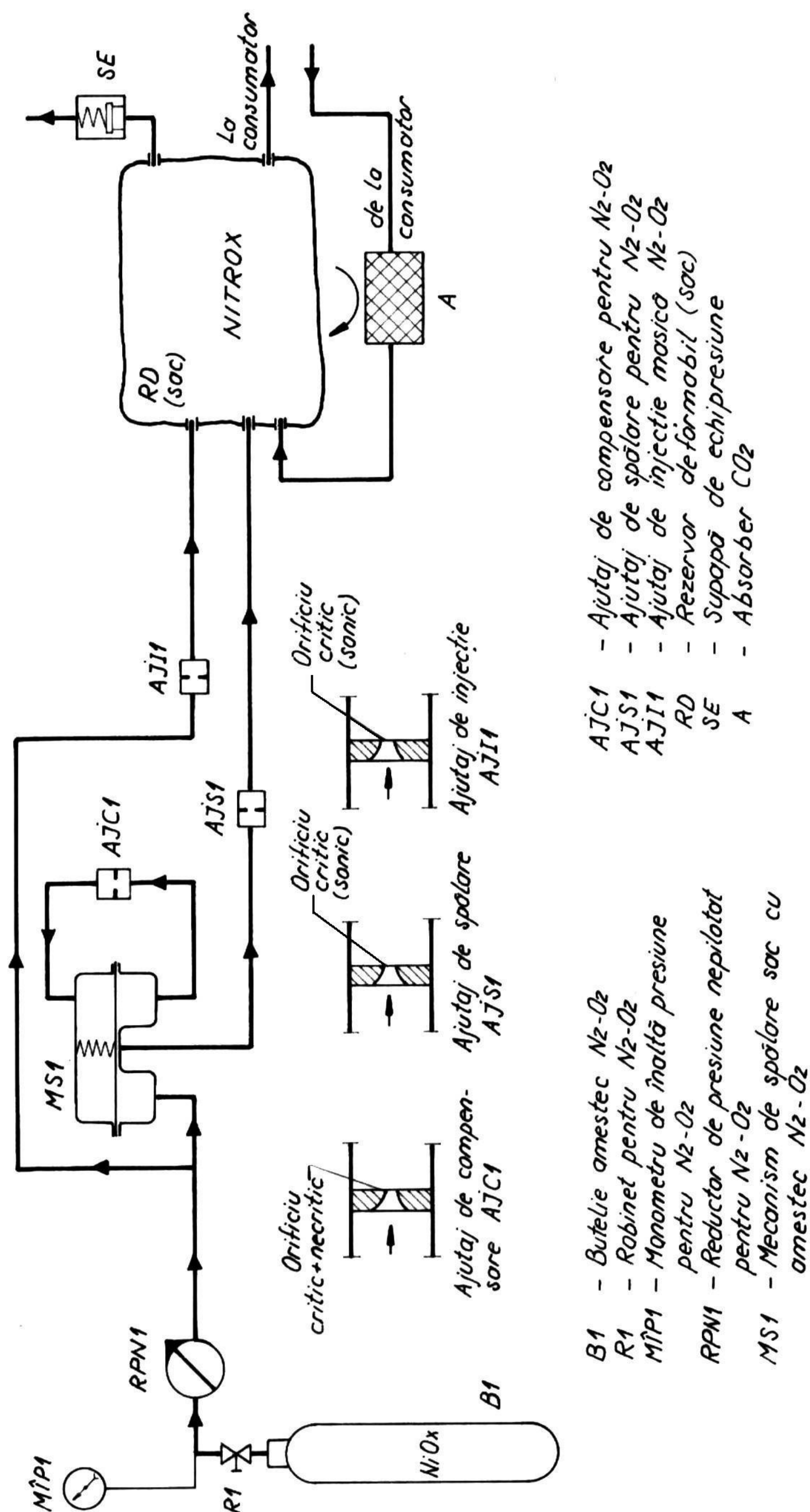


Fig. 5.46. Alcătuirea circuitelor de compensare, spălare şi injecţie masică cu amestec NITROX pentru aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt, variantele 1 şi 2.

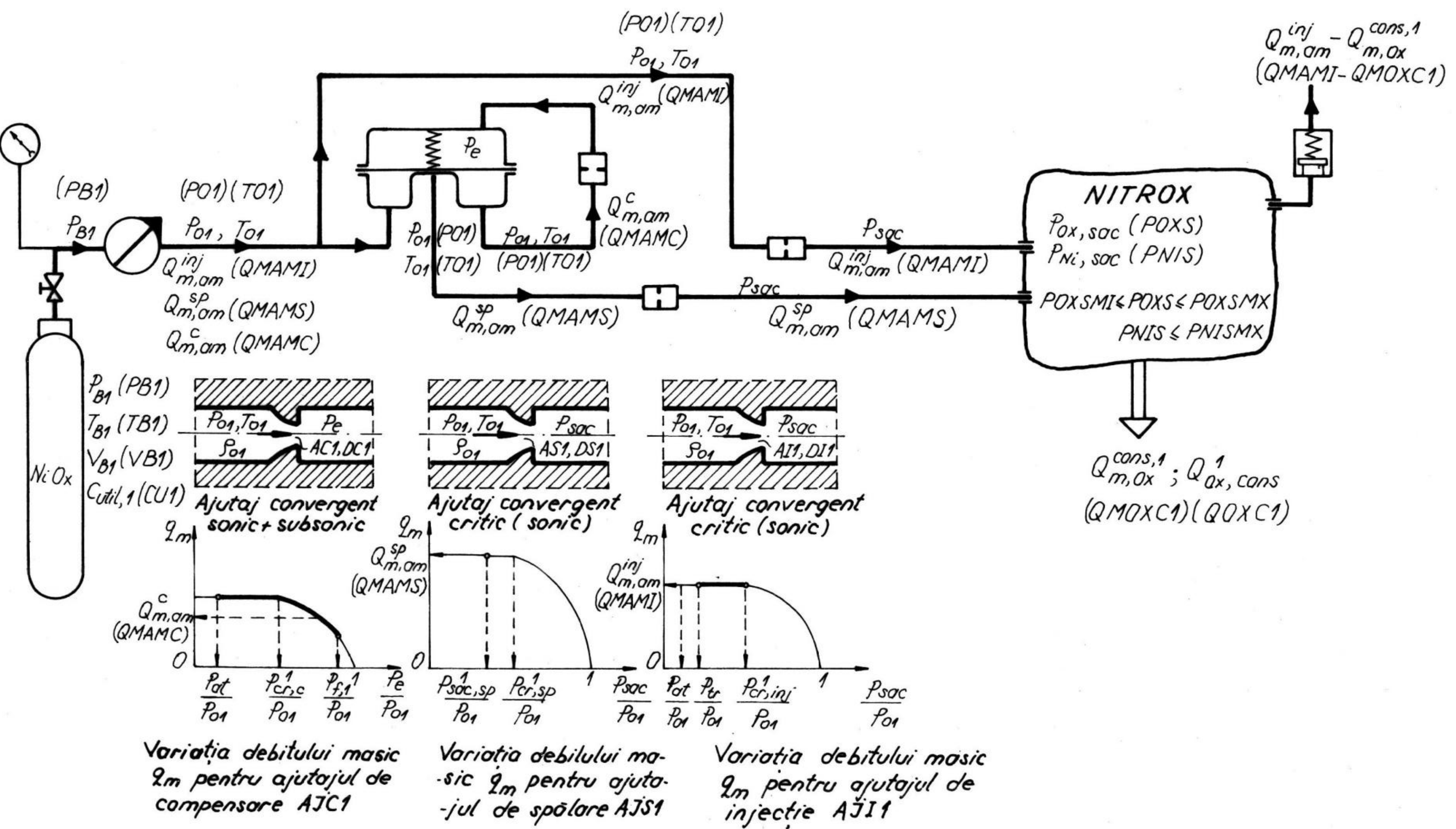


Fig. 5.47. Schema de calcul a circuitelor cu NITROX şi parametrii amestecului în lungul acestora pentru aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt, variantele 1 şi 2.

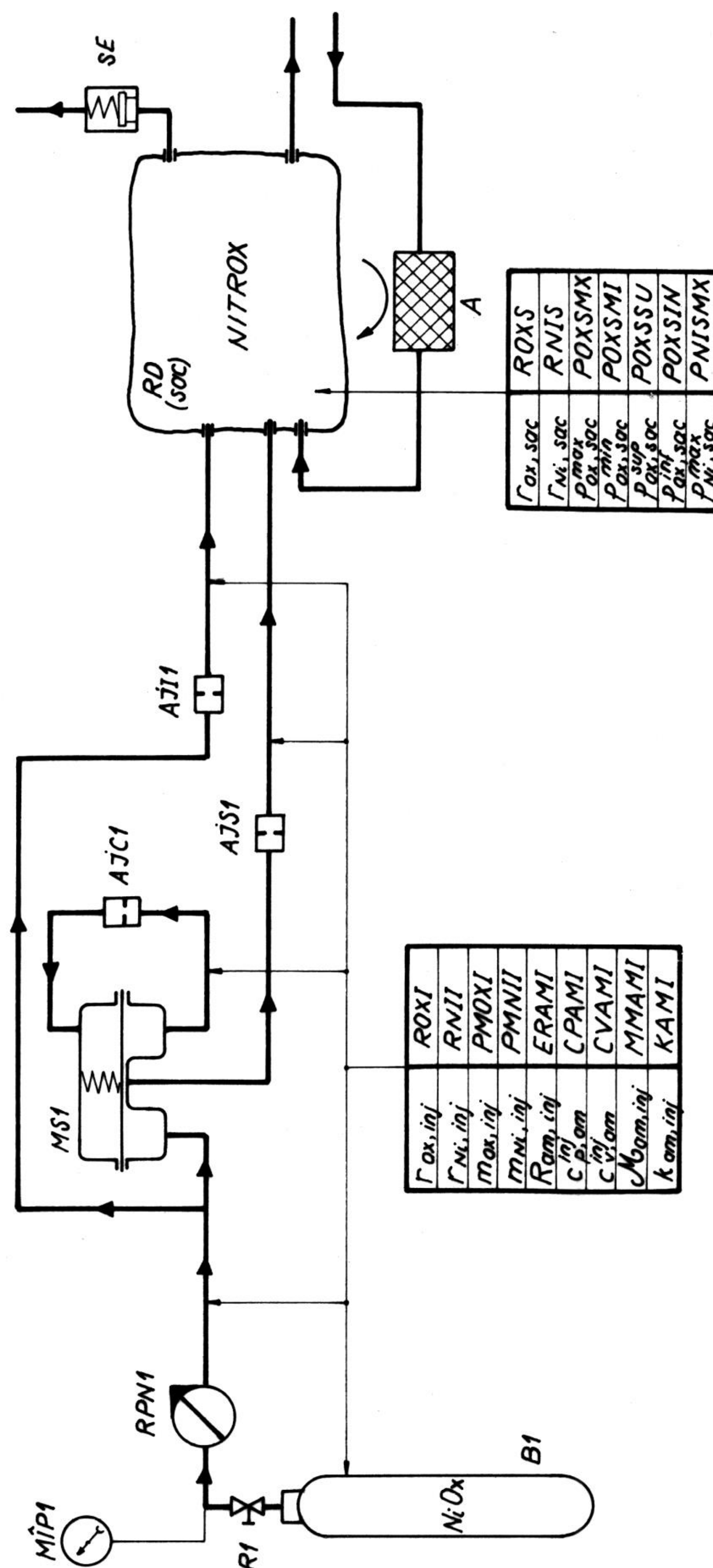


Fig. 5.48. Caracteristicile termodinamice ale amestecului NITROX pe circuitele de compensare, spălare şi injecţie şi în rezervorul deformabil (sacul respirator) pentru aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt, variantele 1 şi 2.

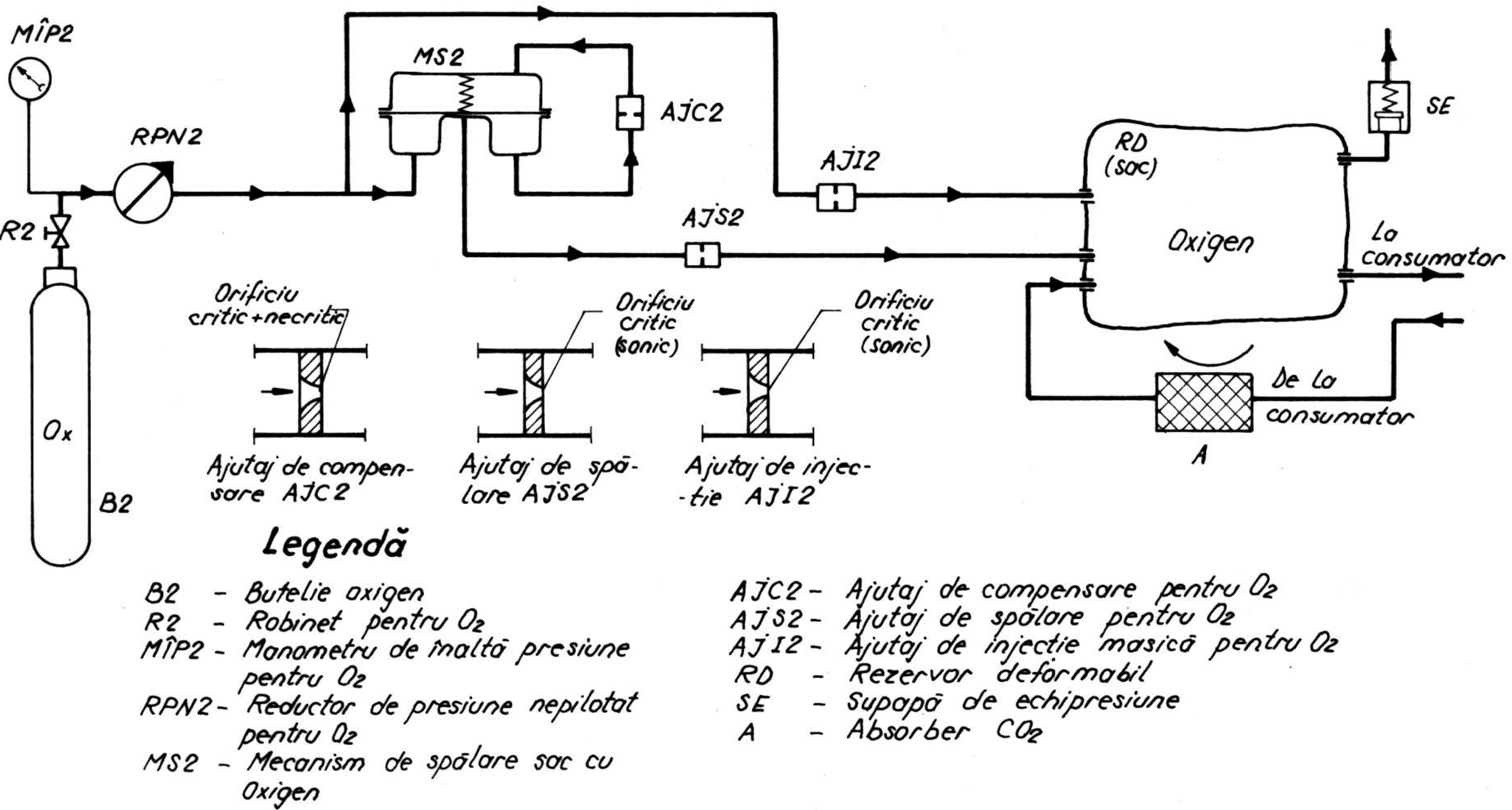


Fig. 5.49. Alcătuirea circuitelor de compensare, spălare şi injecţie masică cu oxigen pentru aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt, varianta 1.

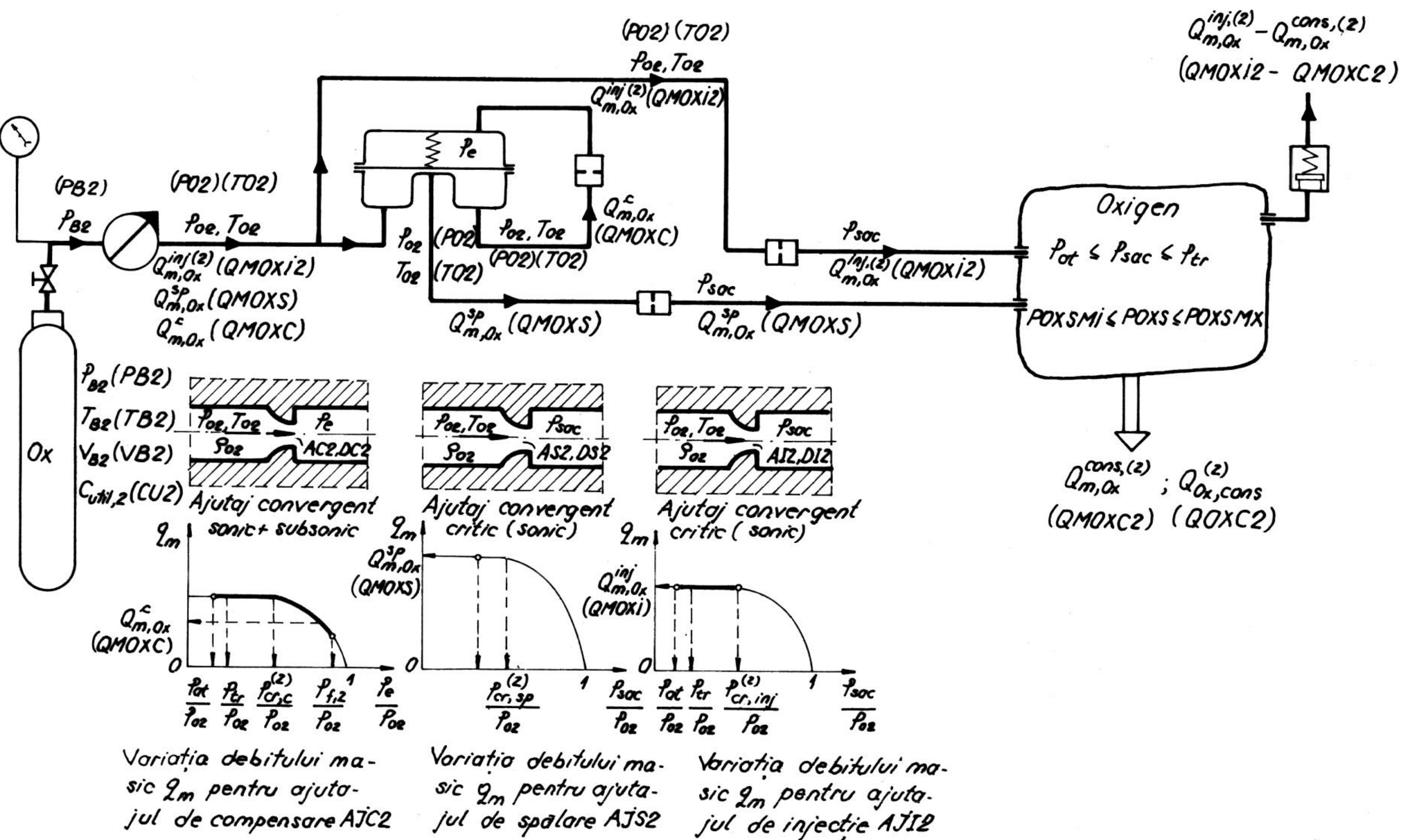


Fig. 5.50. Schema de calcul a circuitelor cu oxigen şi parametrii oxigenului în lungul acestora pentru aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt, varianta 1.

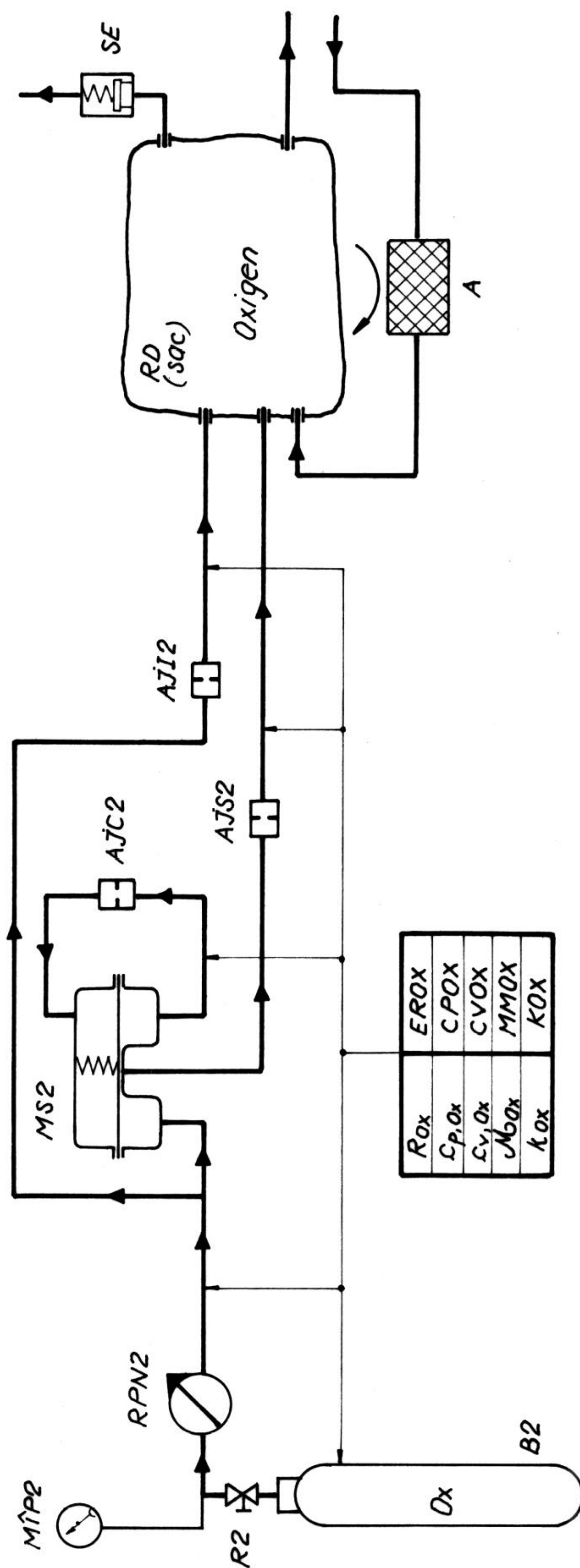


Fig. 5.51. Caracteristicile temodinamice ale oxigenului pe circuitele de compensare, spălare şi injecţie masică pentru aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt, varianta 1.

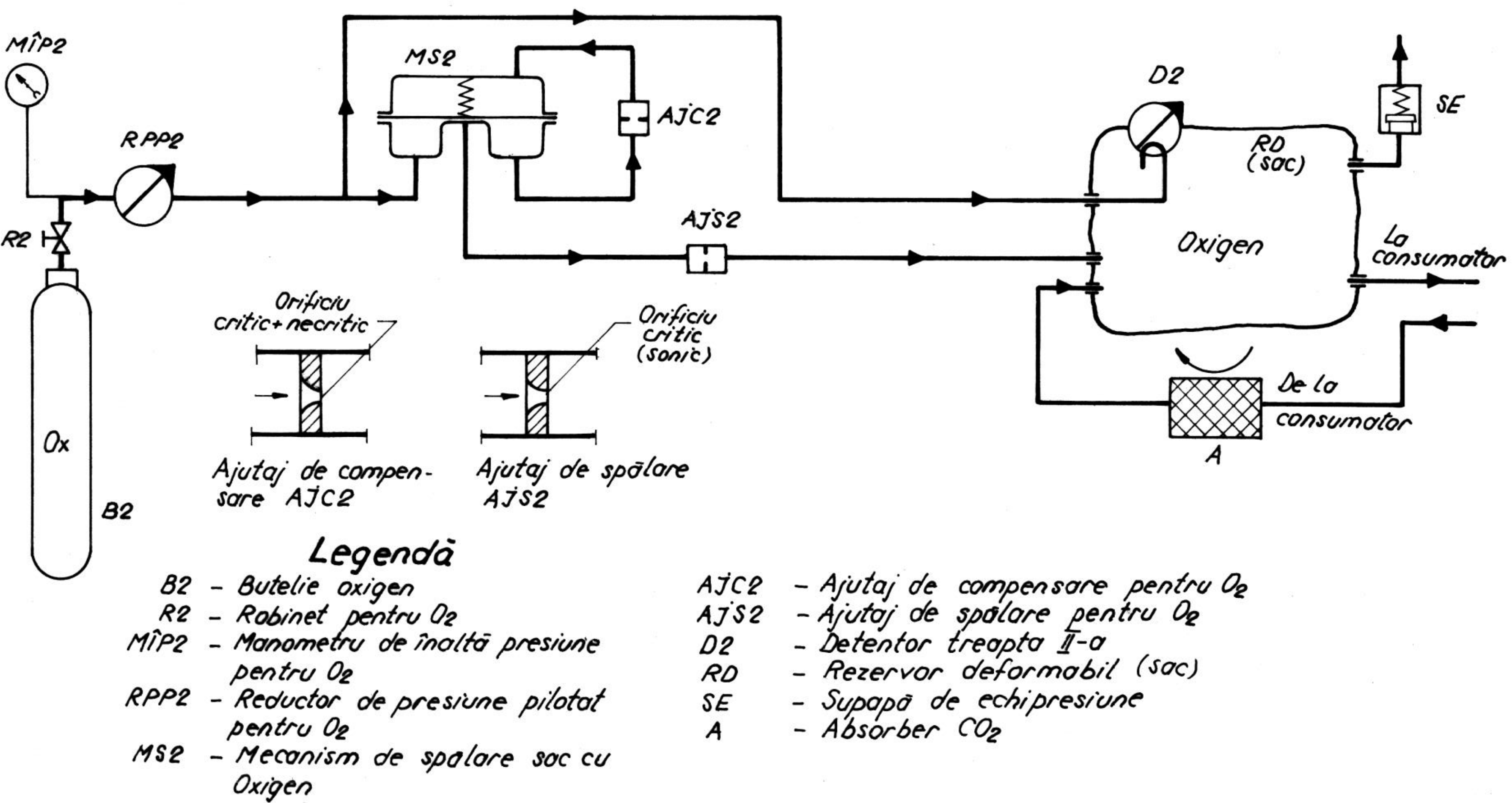


Fig. 5.52. Alcătuirea circuitelor de compensare, spălare şi livrare la cerere a oxigenului, pentru aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt, variantele 2 şi 3.

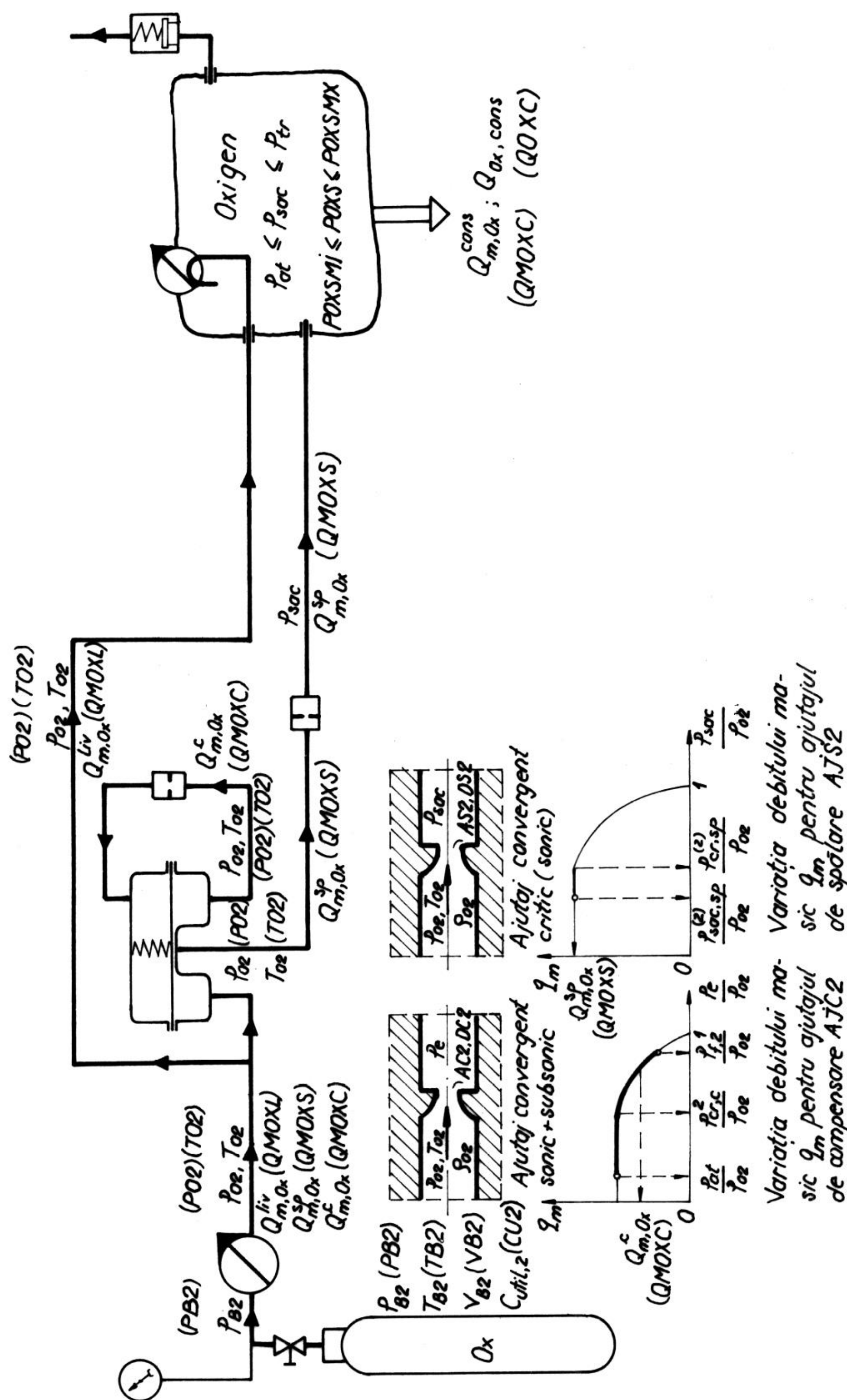


Fig. 5.53. Schema de calcul a circuitelor cu oxigen și parametrii oxigenului în lungul acestora pentru aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt, variantele 2 și 3.

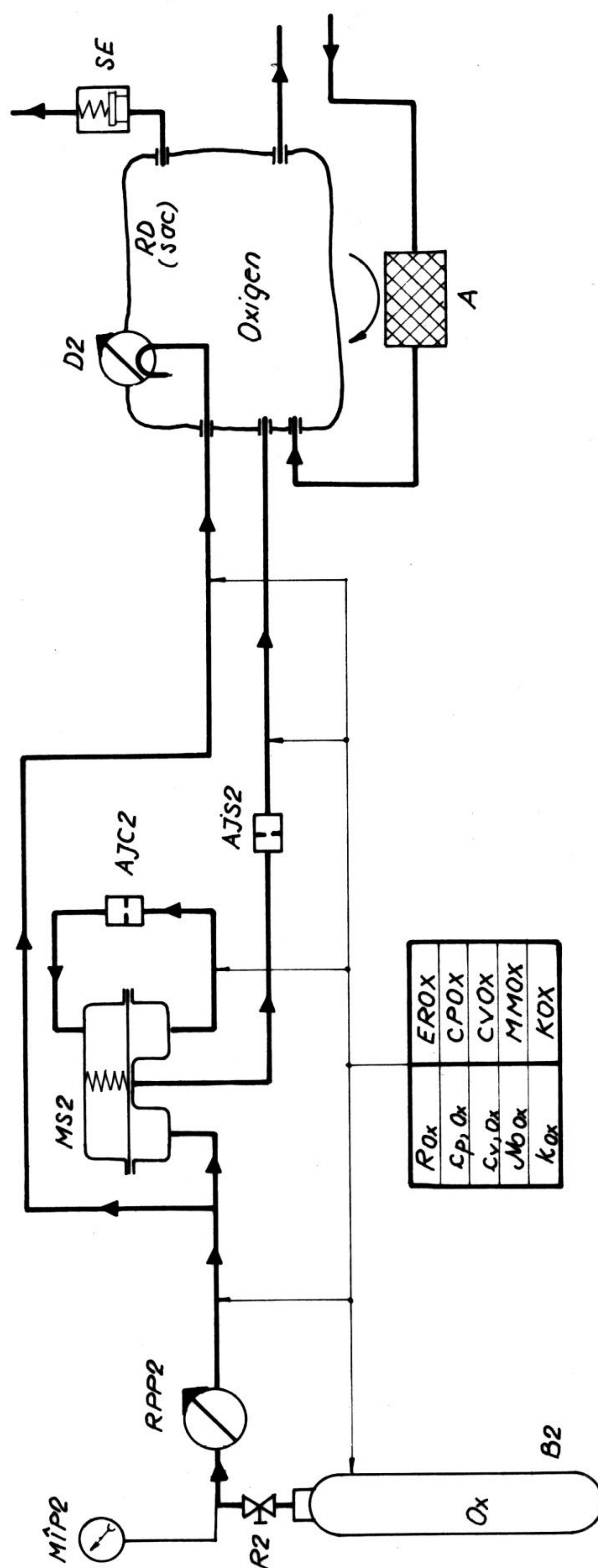


Fig. 5.54. Caracteristicile termodinamice ale oxigenului pe circuitele de compensare, spălare şi livrare la cerere pentru aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt, variantele 2 şi 3.

Dintre cele trei variante, un interes deosebit a suscitat varianta aparatului de respirat sub apă în circuit mixt în care, până la 7 m adâncime, scafandrul respiră oxigen pur "la cerere", iar după această adâncime amestec NITROX supraoxigenat 40/60 (40% oxigen şi 60% azot) în circuit semiînchis până la 40 m adâncime.

Pentru determinare adâncimii de trecere h_{tr}, de pe circuitul de oxigen pe cel de amestec, s-a plecat de la următoarele elemente: viteza maximă de coborâre a scafandrului este de 30 m/min, iar timpul de spălare a sacului respirator este de 15 secunde. În această situaţie, cea mai sigură variantă este începerea spălării sacului respirator de la 10 m adâncime, unde presiunea parţială a oxigenului este de 2 bar (sc. abs.), terminându-se la aproximativ 17,5 m. În cazul revenirii la presiunea atmosferică, când viteza de ridicare este de 15 m/min, spălarea sacului respirator începe la 10 m adâncime şi se termină la aproximativ 6,25 m, ceea ce corespunde tehnologiilor de revenire la presiunea atmosferică după scufundări cu amestecuri NITROX supraoxigenate. Ţinând cont de autonomia aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt rezultă că se pot executa scufundări cu randamente apropiate de 100%, deoarece revenirea la presiunea atmosferică, în general, nu necesită paliere de decompresie.

Calculele de gazodinamic aferente sacului respirator şi circuitelor de alimentare cu oxigen şi amestec NITROX supraoxigenat sunt similare cu cele prezentate pentru aparatul de respirat sub apă în circuit semiînchis.

5.4. COMPARAŢIE ASUPRA EFICIENŢEI APARATELOR SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ

Pentru a se putea face o comparaţie asupra eficienţei aparatelor speciale de respirat sub apă faţă de aparatul cu circuit deschis cu debit "la cerere" s-a adoptat ca indicator de eficienţă raportul:

$$\frac{\text{Consum de oxigen în unitatea de timp}}{\text{Amestec respirator alimentat în unitatea de timp}} \cdot 100\ [\%]$$

Ţinând cont de faptul că eficienţa celor mai multe aparate este funcţie de adăncimea la care sunt utilizate, s-a realizat comparaţia pentru o scufundare la 30 m adâncime [4 bar (sc. abs.)] la un ritm respirator de 12 resp/min cu un volum de maxim 1 l/respiraţie. Datele comparative sunt prezentate în tabelul 5.14.

Tabelul 5.14

Comparaţie asupra eficienţei aparatelor de respirat sub apă

Aparat de respirat sub apă	Eficienţa la adâncimea de 30 m [%]	Condiţii
în circuit deschis "la cerere"	1,2 … 4,2	$Q_{O2,c} = 0{,}5...2$ Nl/min $Q_{aer} = 48$ Nl/min
în circuit semiînchis cu amestec NITROX supraoxigenat 40/60	4,8 … 19,0	$Q_{O2,c} = 0{,}5...2$ Nl/min $Q_{a,i} = 10{,}5$ Nl/min
în circuit mixt	14,4 … 57,0	$Q_{O2,c} = 0{,}5...2$ Nl/min

Din analiza datelor prezentate se observă diferenţe foarte mari între eficienţa aparatelor speciale de respirat sub apă şi aparatul cu debit "la cerere" în circuit deschis. Astfel, se constată o creştere a eficienţei de 4…5 ori în cazul utilizării aparatelor de respirat sub apă în circuit semiînchis comparativ cu cele în circuit deschis cu debit "la cerere" şi de 12 … 13,5 ori în cazul utilizării aparatului în circuit mixt comparativ cu cel în circuit deschis cu debit "la cerere". Aparatele în circuit mixt studiate oferă o eficienţă de trei ori mai mare decât aparatele în circuit semiînchis.

Totuşi, fiecare dintre aceste aparate au o utilizare specifică, ceea ce le detaşează atât din punct de vedere al eficienţei cât şi din punct de vedere al siguranţei pe care o oferă în exploatare. Aparatelor de respirat sub apă studiate oferă o bună securitate, dar sunt recomandate numai scafandrilor profesionişti, testaţi, cu aptitudini fiziologice şi fizice corespunzătoare pentru utilizarea lor.

BIBLIOGRAFIE

ATANASIU, T., GRAD, V., MIHAI, C., GEORGESCU, ŞT. – *Acţiunile scafandrilor deminori în viziunea flotelor occidentale*. Editura EX PONTO, Constanţa, 2000.

BADIU, G., ILIESCU, C., PETRU, A. – *Dynamic study of postural tremor in high pressure conditions.* Roumanian Journal of Physiology, Vol. 28, nr. 3-4, pp. 83-87, Bucureşti, 1991.

BENNETT, P.B. – *Atlantis III, an experimental deep dive to 686 m using TRIMIX 10.* Medicine Subaquatique et Hyperbare, vol. XX, nr. 80, pp. 320-322, 1981.

BERRY, Y., GAVARRY, P., HUBERT, J.P., LE CHUITON, J., PARC, J. – *La plongée et l'intervention sous la mer*. Ed. Arthaud, Paris, 1977.

BÜHLMANN, A.A. – *Decompression. Decompression sickeness*. Springer Verlag, pp. 4-62, Berlin, 1984.

BÜHLMANN, A.A. – *Untersuchungen zur Dekompresssion bei enniedrigtem Luftdruck*. Schweizerische Medizinische Wochenschrift, nr. 114, 1984.

CAYFORD, J.E. - *Underwater Work.* Ed. Lornelle Maritime Press Centreville, Maryland, 1982.

CONSTANTIN, A. – *Transportul gazelor prin sistemul respirator uman şi mijloacele de protecţia respiraţiei, în procese hiperbare.* Teză de doctorat, Universitatea "Ovidius" Constanţa, 1998.

DEGERATU, M., PETRU, A., BEIU, V. – *Computer – aided Simulation of Theoretical Processes in Binary and Ternary Mixtures of Hyperbaric Systems Used in Deep Diving.* **Chemical Abstracts, page 346, 9-Biochem. Methods, vol. 107, Columbus, Ohio, U.S.A., 1986.**

DEGERATU, M. – *Studiu privind gazodinamica unui dispozitiv cu injecţie masică constantă pentru amestecuri binare*. Catedra de Hidraulică, Raport tehnic la C.C. nr. 45/1986, I.C.B., Bucureşti, 1986.

DEGERATU, M. – *Modelarea matematică a fenomenelor gazodinamice specifice unui sistem cu injecţie la debit masic constant pentru amestecuri respiratorii binare*. A II-a Sesiune de Comunicări ştiinţifice cu tema Inginerie, tehnologie şi medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanţa, 1988.

DEGERATU, M. – *Simularea teoretică a funcţionării aparatului de scufundare ASMA cu amestec Heliu-Oxigen.* A IV-a Sesiune de Comunicări Ştiinţifice cu tema Inginerie, tehnologie şi medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanţa, 1989.

DEGERATU, M. – *Modelarea matematică a proceselor gazodinamice din cadrul aparatelor de scufundare utilizând oxigen pur şi amestec binar.* Catedra de Hidraulică, Raport tehnic la C.C. nr. 73/1989, I.C.B., Bucureşti, 1989.

DEGERATU, M. – *Calculul termohidraulic al circuitelor aferente echipamentelor de scufundare ASMAR-AMOX.* Catedra de Hidraulică şi Protecţia Mediului, Raport tehnic la C.C. nr. 108/1991, I.C.B., Bucureşti, 1991.

DEGERATU, M., PETRU, A., IONIŢĂ, S. – *Manualul scafandrului.* Ed. Per Omnes Artes, Bucureşti, 1999.

DEGERATU, M., PETRU, A., GEORGESCU, Şt. – *Aparate de respirat sub apă*. Ed. MATRIX ROM, Bucureşti, 2003.

DEGERATU, M., PETRU, A., GEORGESCU, Şt., IONIŢĂ, S. – *Tehnologii hiperbare pentru scufundări unitare şi în saturaţie*. Ed. MATRIX ROM, Bucureşti, 2003.

DEGERATU, M. – *Studii de optimizare a activităţilor de scufundare prin utilizarea amestecurilor de gaze şi a tabelelor de decompresie tip NITROX*. Raport tehnic la C. C. Poziţia 124 din Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naţionale, Bucureşti, 2013.

DEGERATU, M. – *Analiza teoretică a curgerii gazelor prin ajutaje* şi *conceperea unui stand experimental de preparare a amestecurilor de gaze în flux continuu.* Raport tehnic la C. C. Nr.A3312/11.09.2014, Contract UTCB Nr. 208/2014, Bucureşti, 2014.

DINU, D., VLAD, C. – *Scafandri şi vehicule subacvatice.* Editura Ştiinţifică şi Enciclopedică, Bucureşti, 1986.

DINU, D., PÎNZARU, M., STANCU, C., VLAD, C. – *Tehnologii subacvatice. Autorizarea activităţilor subacvatice*. Ed. Tehnică, Bucureşti, 2000.

FRUCTUS, X., SCIARLI, R.L. – *La plongée santé et securité*. Editions Maritimes et d'Outre-Mer, Paris, 1980.

GARDETTE, B. – *HYDRA IV and HYDRA V, human deep hydrogen dives 1983-1985. In hydrogen as a diving gas*. 33-rd Under sea and Hyperbare Medical Society Workshop. Ed. BRAUER R. W., 1987.

HALDANE, J.S., PRIESTLEY, J.G. – *Respiration*. 2nd ed. New Haven, Yale University Press, 1935.

HAUX, G. – *Tauchtechnik. Band I*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1969.

HEMPLEMAN, H.V., GARRARD, J.T., HARRIS, D.J., HAYES, P.A., HENNESSY, T.Y., NICHOLS, G., TOROK, Z., WINSBOROUGH, M.N. – *U.K. deep diving trials*. Phil. Trans. R. Soc. London, B304, pp. 119-141, London, 1984.

IAMANDI, C., DEGERATU, M. – *Studiu teoretic privind circuitul de injecţie a amestecului gazos aferent echipamentului de scufundare tip ASMA*. Sesiune de Comunicări Ştiinţifice cu tema "Contribuţii româneşti în ingineria şi tehnologia activităţilor subacvatice", Centrul de Scafandri, Constanţa, 1987.

JONES, H.S. – *Respiration System: Nitrogen Elimination*. Medical Physics, vol. II, Chicago Year Book Publishers, 1950.

LAMBERTSEN, C.J. – *Effects of Excesive Pressure of Oxygen, Nitrogen, Helium, Carbon Dioxide and Carbon Monoxide*. Medical Physiology. Ed. V.B. Mountcastle, vol. II, 1980.

LARN, R., WHISTLER, R. – *Commercial Diving Manual*. Ed. David & Charles, 1984.

LEMAIRE, C. – *Utilisation de l'oxigen en plongée.* C.E.H. COMEX, Marseille, 1977.

LUBITZSCH, W. – *Aspekte der modernen Tauchgeräte-technik.* Drägerheft, nr. 301, Lübeck, 1975.

PASTUCH, C.O. – *Testarea solicitării funcţiei respiratorii şi circulatorii în cursul adaptării şi muncii în mediul hiperbar*. Teză de doctorat, Institutul de Medicină şi Farmacie Cluj-Napoca, 1987.

PETRU, A. – *Aparate autonome de respirat sub apă.* Buletinul Marinei Militare, nr. 2, Constanţa, 1985.

PETRU, A., BEIU, V., DEGERATU, M. – *Studiu privind optimizarea rezervei de gaz pentru creşterea autonomiei în scufundare.* A II-a Sesiune de Comunicări Ştiinţifice cu tema "Inginerie, tehnologie şi medicină subacvatică", Centrul de Scafandri, Constanţa, 1985.

PETRU, A. – *Amestecuri respiratorii.* Buletinul Tehnica Militară, nr. 3-4 , Bucureşti, 1987.

PETRU, A. – *Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis.* Buletinul Tehnica Militară, nr. 4, Bucureşti, 1989.

PETRU, A., DEGERATU, M., IONIŢĂ, S. – *Ghidul scafandrului autonom*. Editura Olimp-Press, Bucureşti, 1992.

PETRU, A. – *Hidraulica proceselor hiperbare*. Teză de doctorat, Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti, 1993.

PENZIAS, W., GOODMAN, M.V. – *Man Beneth the Sea – A Review of Underwater Ocean Engineering*. Ed. Wiley-Interscience, New York, 1973

POULET, G., BARINCOU, R. – *La plongée*. Ed. Denöel, Paris, 1988.

VANN, R.D. – *Decompression theory and applications. The Physiology and Medicine of Diving.* 3-th edition. Ed. P.B. BENNETT & D.H. ELLIOT, pp. 353-380, London, 1982.

VLAD, C., DINU, D. – *Inteventţii subacvatice.* Editura Tehnică, Bucureşti, 1982.

WILLIAMS, S. – *Underwater Breathing Apparatus.* The Physiology and Medicine of Diving and Compresed Air Work, Ed. P.B. Bennett & Elliot D.H. Bailliere Tindal and Cassell, London, 1969.

WORKMAN, R.D. – *Calculation of decompression schedule for nitrogen-oxigen and helium-oxygen dives*. Report 6-65 US Navy Experimental Diving Unit, Washington D.C., 1965.

ZINKOWSKI, N.B – *Commercial Oil-Field Diving.* Ed. Cornelle Maritime Press, Centreville, Maryland, 1985.

* * * - *The NOAA Diving Manual-Diving for Science and Tehnology*. U.S. Government Printing Office, Washington, 1975.

* * * - *U.S. Navy Diving Manual*. U. S. Government Printing Office, Washington, 1975.

* * * - *Linde Gasekatalog.* Linde AG, Werksgruppe Technische Gase, München.